

一种新的安全鲁棒全息数字水印技术

孙刘杰, 王子煜

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: 提出了一种将快速响应矩阵码(QR 码)作为水印的加密同轴全息数字水印技术。该算法将 QR 码作为水印,提高了水印的鲁棒性;利用双随机相位调制技术对水印加密,增强了水印的安全性;通过离散小波变换将全息水印图像嵌入彩色载体图像的中频系数中,兼顾了水印的不可见性和鲁棒性。提取水印时,进行高斯滤波处理,增加了 QR 码译码成功率。实验表明,该算法有良好的不可见性和鲁棒性。

关键词: 快速响应矩阵码; 数字水印; 全息水印; 离散小波变换

中图分类号: TS853⁺.6; TP309.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)01-0106-04

A New Holographic Digital Watermarking Technology with Good Security and Robustness

SUN Liu-jie, WANG Zi-yu

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

Abstract: An inline holographic digital watermark technology using quick response code (QR code) as watermark was put forward. The algorithm used QR code as watermark to improve robustness; the watermark was encrypted by double random phase encryption technology to enhance security. The encrypted watermark embedded into the medium frequency by using discrete wavelet transform which could take both invisibility and robustness into account. In watermark extraction, Gaussian filter enhanced recognition and decoding of the QR code. Experiments showed that the algorithm has good invisibility, security, and robustness.

Key words: quick response code; digital watermark; holographic watermark; discrete wavelets transform

自从 Takai Nobukatsu 和 Mifune Yuto 提出了将物体的傅里叶变换全息图像作为水印直接叠加到载体图像中的方法^[1],实现了光全息技术与数字水印技术的结合后,数字水印与光全息技术相结合的水印算法得到了越来越多的关注。随着数字水印算法的不断发展,将二维条码和数字水印相结合的防伪方式逐渐成为一种新的趋势。目前,更多的学者已经将优秀的水印算法与数字全息技术相结合,增强了水印的鲁棒性与安全性^[2-4]。笔者在这些研究的基础上,将 QR 码^[5]与加密全息技术相结合,提出一种新的安全鲁棒全息数字水印算法,作为一种新的数字版权保护方法。

该方法是将具有特定意义的标识信息编码为 QR

码,将 QR 码作为数字水印,利用双随机相位调制对其加密,再生成全息图。然后将彩色载体图像颜色空间转换到标准颜色空间上,对图像的 L 分量进行二级小波分解,将生成的同轴全息水印嵌入到二级小波分解后的中频系数中。在提取水印时,由于提取的水印图像含有背景白噪声,影响提取效果,故进行高斯滤波处理,以利于解码 QR 码水印中携带的数字版权信息。

1 引入 QR 码的加密同轴全息水印技术

1.1 技术可行性分析

在选择和处理水印图像时,由于 QR 码引入

收稿日期: 2012-11-05

基金项目: 上海市研究生创新基金项目(JWCXSL1202);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: 孙刘杰(1965-),男,安徽人,博士,上海理工大学教授,主要研究领域为光学信息、数字印刷、印刷防伪等。

Reed-Solomon 纠错算法,使得 QR 码最多能纠错 30% 的码字信息。所以选择将其作为水印,可以对提取出的水印图像进行纠错,从 QR 码中译码出其中携带的水印信息,这样就在很大程度上增强水印的鲁棒性;在对水印加密时,使用了双随机相位模板对水印信息进行调制,相位模板随机生成,数据量大,从而在很大程度上提高了水印系统的安全性。

在选择水印的嵌入位置和算法时,由于载体图像为彩色,为了确保图像在不同的设备上传输时保持颜色的一致性,故将 RGB 颜色空间转换为 CIELAB 标准颜色空间,此颜色空间可保证彩色图像在设备间传输时颜色失真小;在选择水印的嵌入位置时,将水印嵌入到二级小波分解后的中频系数中,可以兼顾不可见性和鲁棒性。

在水印的提取时,由于加密全息技术会在水印系统中引入一定量的背景白噪声,这对 QR 码的解码会有影响,故对获取的水印图像进行高斯滤波处理,从而提高 QR 码的解码率。综上所述,引入 QR 码的加密同轴全息水印技术,有良好的不可见性和强鲁棒性,经过一定的高斯低通滤波处理,可以正确译码水印信息。

1.2 技术实现的方法步骤

下面给出实现该技术的步骤。该水印技术的算法流程见图 1。

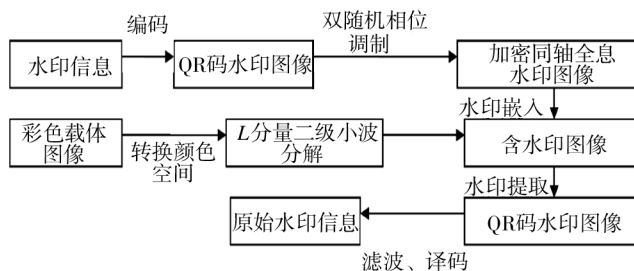


图 1 水印技术算法流程

Fig. 1 Flowchart of watermark technology algorithm

1.2.1 水印信息预处理

将水印信息“光学”按照 GB/T 18284—2000 中相关规定编码为 QR 码,纠错等级设为 M,版本为 1,大小为 128×128 像素,见图 2。

1.2.2 生成加密同轴全息水印图像^[2-3]

1.2.2.1 双随机相位加密

设预处理后的 QR 码水印图像为 $f(x, y)$, 其中 (x, y) 是空域坐标。令 (ξ, η) 为频域坐标。生成 2 个



图 2 QR 码水印

Fig. 2 QR code watermark

随机相位模板 $p(x, y)$ 和 $b(\xi, \eta)$, 作为加密密钥。则双随机相位加密后的图像 $\varphi(x, y)$ 为:

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

式中: $h(x, y)$ 是 $B(\xi, \eta) = \exp[j2\pi b(\xi, \eta)]$ 的脉冲响应; * 为卷积运算符号。 $\varphi(x, y)$ 包含了振幅信息和相位信息, 是一个复数图像, 不可直接嵌入载体图像, 还需作滤波处理。加密后的水印信息见图 3。

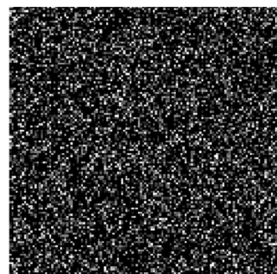


图 3 加密水印图像

Fig. 3 Encrypted watermark image

1.2.2.2 生成同轴全息水印图像

对双随机相位加密后的水印图像做滤波处理后, 得到 $\varphi(x, y) = A(x, y) \exp[j\phi(x, y)]$, 随机生成同轴参考光, 设同轴参考光的相位为 $\exp[j\phi_0]$, 其中 ϕ_0 为某一常数, 则加密同轴全息图像为:

$$H(x, y) = |A(x, y) \exp\{j[\phi(x, y) + \phi_0]\} + \exp[j\phi_0]|^2 = 1 + |A(x, y)|^2 + A(x, y) \exp[j\phi(x, y)] + A(x, y) \exp[-j\phi(x, y)] \quad (2)$$

式中: $A(x, y) \exp[j\phi(x, y)]$ 项为原始加密图像的信息; $1 + |A(x, y)|^2 + A(x, y) \exp[-j\phi(x, y)]$ 项中, 常数项可用零级滤波去除, $|A(x, y)|^2$ 项可以通过计算其功率谱或零级滤波加以去除, $A(x, y) \exp[-j\phi(x, y)]$ 项增加了恢复图像的背景高斯白噪声的方差。则处理后可得到新的加密同轴全息图像 $H(x, y)$ 为:

$$H(x,y) = A(x,y) \exp[j\phi(x,y)] + A(x,y) \cdot \exp[-j\phi(x,y)] \quad (3)$$

生成的加密同轴全息水印图像见图 4, 重建的 QR 码水印图像见图 5。

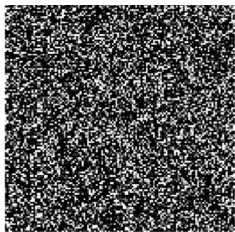


图 4 加密同轴全息水印图像

Fig. 4 Encrypted hologram image

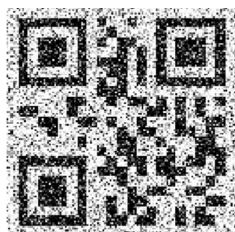


图 5 重建的水印图像

Fig. 5 Image reconstructed from Encrypted hologram image

1.2.3 水印嵌入位置的选择

将彩色载体图像颜色空间转换到 CIELAB 颜色空间, 对其 L 分量进行二级小波分解, 得到的中频系数为 H_2L_2 , L_2H_2 , H_2H_2 , 为了兼顾鲁棒性和不可见性, 选择中频系数 H_2H_2 作为水印嵌入位置。

1.2.4 水印的嵌入

设 $C(x,y)$ 为载体图像的中频系数 H_2H_2 , α 为嵌入强度, 则含水印的载体实值图像为:

$$I(x,y) = \alpha H(x,y)' + C(x,y) \quad (4)$$

将水印嵌入到载体图像中频系数后, 对其进行二级小波重构, 得到 L 分量。最后, 将颜色空间转换到 RGB 颜色空间, 即可得到嵌入水印后的彩色载体图像。

1.2.5 水印的提取

提取原始水印图像时, 要将含水印的彩色载体图像颜色空间转换到 CIELAB 颜色空间, 对 L 分量进行二级小波分解, 得到中频系数 H_2H_2 , 对 H_2H_2 进行傅里叶变换, 并用随机相位模板 $b(\xi, \eta)$ 调制, 再进行逆傅里叶变换后与随机相位模板 $p(x,y)$ 调制, 即可得到原始水印图像 $f(x,y)$ 。

由于提取出的 QR 码水印图像会含有白噪声, 不

利于译码识读, 所以要对水印图像进行高斯滤波处理, 处理后, 就可以通过 QR 码识读器进行译码, 得到其中携带的水印信息。

2 实验与分析

2.1 客观评价指标

1) 采用峰值信噪比 (PSNR) 客观评价原始彩色图像与嵌入水印后的载体图像之间的差别。彩色图像的 PSNR 计算公式如下:

$$\text{PSNR} = 10 \lg \frac{255^2}{[(\text{MSE}(R) + \text{MSE}(G) + \text{MSE}(B))]/3} \quad (5)$$

其中的均方差 (MSE) 计算公式为:

$$\text{MSE} = \frac{1}{N \times N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [X^*(i,j) - X(i,j)]^2 \quad (6)$$

式中: $X^*(i,j)$ 表示嵌入水印后图像的 R, G, B 分量的像素值, $X(i,j)$ 表示原始水印图像的 R, G, B 分量的像素值。

2) 采用归一化相似度 (NC) 对提取后的水印图像和原始水印图像的相似性进行客观评价, 公式如下:

$$\text{NC} = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N w(x,y) w'(x,y)}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N w(x,y) w(x,y)} \quad (7)$$

式中: $w(i,j)$ 代表原始水印信息; $w'(x,y)$ 表示提取的水印信息。

2.2 实验结果与分析

实验所用载体图像为 512×512 像素的彩色图像, 见图 6, 所用水印图像为大小是 128×128 像素的携带



图 6 彩色载体图像

Fig. 6 Carrier image

版本信息“光学”2 个汉字的 QR 码二值图像, 见图 2。

2.2.1 不可见性

为了评价水印系统的不可见性,仿真实验提出的水印算法后,从图 7a 可以看出,原始图像和嵌入水印后的图像几乎一样,人眼感觉不到二者的差异,说明了水印具有较好的不可见性。从客观评价的计算数据看出,嵌入水印后的图像的峰值信噪比为 38.1919 dB,也说明了不可见性良好。

2.2.2 鲁棒性

1) JPEG 有损压缩攻击:对含水印图像进行质量因子 80% ,60% ,40% 的有损压缩攻击,图 7b 为质量因子 40% 的有损压缩攻击的仿真结果。

2) 椒盐噪声攻击:加入椒盐噪声强度分别为 2% ,4% ,图 7c 为添加 4% 椒盐噪声的仿真结果。

3) 高斯噪声攻击:加入高斯噪声强度分别为 0.003,0.005,0.007,图 7d 为添加强度为 0.007 的高斯噪声的仿真结果。

4) 中值滤波攻击:进行 3×3 大小的中值滤波攻击,图 7e 为仿真结果。

5) 剪切攻击:分别对含水印图像剪切 20% ,30% ,50% ,图 7f 为剪切 50% 的仿真结果。

实验结果见图 7,实验数据见表 1。



图 7 水印攻击实验结果

Fig. 7 Results of watermark attack experiments

通过表 1 可以看出,引入 QR 码的加密同轴全息数字水印技术具有良好的不可见性,对 JPEG 有损压缩攻击、椒盐噪声攻击、高斯噪声攻击、中值滤波攻击和剪切攻击均具有一定的鲁棒性,且在对提取出的 QR 码水印图像进行一定图像处理,可以增加版权信息译出的成功率。

表 1 水印攻击实验数据

Tab.1 Data of watermark attack experiments

攻击操作	NC	PSNR/dB	译码结果
JPEG 压缩 80%	0.9504	36.1144	成功
JPEG 压缩 60%	0.9418	35.4710	成功
JPEG 压缩 40%	0.9077	34.5517	成功
椒盐噪声 2%	0.8585	27.4610	成功
椒盐噪声 4%	0.8497	22.9799	成功
高斯噪声(0,0.003)	0.9343	28.5566	成功
高斯噪声(0,0.005)	0.9033	26.6625	成功
高斯噪声(0,0.007)	0.8725	25.3731	成功
中值滤波[3 3]	0.8139	29.2934	成功
剪切 20%	0.9474	28.9164	成功
剪切 30%	0.9117	26.6230	成功
剪切 50%	0.7562	22.9623	成功

3 结论

提出了一种将 QR 码作为水印的加密同轴全息水印技术。利用了 QR 码的纠错能力提高水印鲁棒性,利用加密同轴全息水印技术增强了水印安全性,并结合离散小波变换方法,兼顾了不可见性和鲁棒性。从理论上分析了该水印技术的可行性,并用仿真实验证明了该算法具有抗 JPEG 有损压缩、椒盐噪声、高斯噪声、中值滤波和剪切攻击的能力。

本水印算法载体图像为彩色,且在提取水印时,不需要原始图像参与,属于盲水印,具有广泛的应用前景。然而,在嵌入水印图像时,直接与载体图像二级小波分解后的中频系数叠加的方法会在一定程度上影响水印的不可见性。

参考文献:

[1] TAKAI Nobukatsu,MIFUNE Yuto. Digital Watermarking by a Holographic Technique [J]. Applied Optics, 2002, 41 (5):865-873.

[2] 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):31-43.

SUN Liu-jie, ZHUANG Song-lin. Anti-fake Technique by Double Random Phase Encrypted Holographic Mark [J]. Acta Optica Sinica,2007,27(1):31-34.

[3] 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.

图 10b, NC 值为 0.9602。



图 10 任意缩放旋转后的图像及提取出的水印

Fig. 10 The rotated and scaled image and the extracted watermark

3 结论

根据仿真实验中的提取效果,所提的基于归一化的全息数字水印技术可以充分发挥归一化技术的仿射不变性及全息技术的抗裁剪的性能,所以该数字水印技术具有很好的抗仿射变换的能力,可以用于数字作品的版权保护。

参考文献:

- [1] 宋琪,罗航建. 基于归一化图像的抗仿射变换攻击的水印算法[J]. 信号处理, 2008, 24(3): 377-380.
SONG Qi, LUO Hang-jian. Affine Robust Image Watermarking Based on Image Normalization[J]. Signal Processing, 2008, 24(3): 377-380.
- [2] 文展,黄小燕,文成玉. 基于归一化小波域抗几何攻击的图像水印算法[J]. 数字视频, 2008, 32(2): 21-23.
WEN Zhan, HUANG Xiao-yan, WEN Cheng-yu. Image Watermarking Algorithm Based on Geometric Attacks in Normalized Wavelet Domain[J]. Digital Video, 2008, 32(2): 21-23.
- [3] PEI Soo-chang, LIN Chao-nan. Image Normalization for Pattern Recognition[J]. Image and Vision Computing, 1995,

13(10): 711-723.

- [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]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(4): 6218-6224.
- [5] 李孟涛,孙刘杰,李晨璐. 基于小波变换的傅里叶加密印刷水印算法研究[J]. 包装工程, 2012, 33(1): 108-112.
LI Meng-tao, SUN Liu-jie, LI Cheng-lu. Research on Fourier Encryption Printing Watermarking Algorithm Based on Wavelet Transform[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(1): 108-112.
- [6] 李晨璐,孙刘杰,李孟涛. 强鲁棒性全息水印算法[J]. 包装工程, 2012, 33(13): 104-107.
LI Chen-lu, SUN Liu-jie, LI Meng-tao. Robust Holographic Watermarking Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(13): 104-107.
- [7] 朱竹青,冯少彤,聂守平,等. 基于离散余弦变换的复值加密图像隐藏技术[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.
- [8] 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.
- [9] 丁盈盈,刘真. 3种频域数字水印算法的分析和比较[J]. 包装工程, 2011, 32(5): 103-107.
DING Ying-ying, LIU Zhen. Analysis and Comparison of Three Kinds of Frequency Domain Digital Watermarking Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(5): 103-107.

(上接第 109 页)

- SUN Liu-jie, ZHUANG Song-lin. Forgery Prevention Based on Inline Fourier Holographic Watermark with Double Random Phase Encryption[J]. Act, 2007, 27(4): 621-624.
- [4] 李孟涛,孙刘杰,基于小波变换的傅里叶加密印刷水印算法研究[J]. 包装工程, 2012, 33(1): 108-112.
LI Meng-tao, SUN Liu-jie. Research on Fourier Encryption Printing Watermarking Algorithm Based on Wavelet Trans-

form[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(1): 108-112.

- [5] GB/T 18284-2000, 快速响应矩阵[S].
GB/T 18284-2000, QR Code[S].
- [6] FENG Xiao-fei, JI Xing-zhong. A Blind Watermarking Method with Strong Robust Based on 2D-barcode[C]. 2009 International Conference on Information Technology and Computer Science, 2009.