

# 基于双快速反应码双随机相位加密系统的多重水印方法

吴为民<sup>1</sup>, 陈家祯<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>福建船政交通职业学院信息工程系, 福建 福州 350007;

<sup>2</sup>福建师范大学数学与信息学院, 福建 福州 350007

**摘要** 提出了一种快速反应(QR)码结合双随机相位加密系统及频分复用的多重水印方法。为了扩大水印容量, 首先将 QR 码的有效编码区域组合为新图像, 再将两幅组合后的图像分别作为实部与虚部, 构成双 QR 码复信号。在空间域和空间频率域用随机相位模板将复信号编码为复噪声形式的加密水印信号。对各组双 QR 码加密水印信号进行预处理及频分复用, 以产生多重水印。水印信号以冗余方式嵌入宿主图像经拉普拉斯分解后残差分量的中高频区域, 水印信号的恢复无需原始宿主图像, 可实现盲提取。仿真结果表明, 所提方法在缩放、滤波和旋转等方面表现出较好的稳健性, 对 JPEG 压缩、剪切、高斯噪声等也具有一定的稳健性。分析了复用容量及作为密钥的随机相位模板对重建水印质量的影响。

**关键词** 全息; 快速反应码; 双随机相位加密; 多重水印; 拉普拉斯分解

**中图分类号** O438; TP309 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.120901

## Multiple Watermarking Method Based on Double Random Phase Encryption System with Double Quick Response Code

Wu Weimin<sup>1</sup>, Chen Jiazhen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Information Engineering, Fujian Chuanzheng Communications College, Fuzhou, Fujian 350007, China;

<sup>2</sup>School of Mathematics and Informatics, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China

**Abstract** A multiple watermarking method combining a double random phase encryption system, frequency division multiplexing technology and quick response (QR) code is proposed. In order to enlarge the watermark capacity, an effective coding region of QR code is combined into a new image, and then the two composite images are used as real and imaginary parts respectively to form double QR code complex signals. The complex signal is encoded with random phase masks in the space domain and the spatial frequency domain into an encrypted watermark signal in form of complex noise. The double QR code encryption watermark signals are preprocessed and frequency division multiplexing is used to generate multiple watermark. The watermark signal is embedded redundantly in the medium-high frequency region of the residual components of the host image after Laplace decomposition. The watermark signals can be recovered without original host image, and the blind extraction can be achieved. Simulation results show that the proposed method is robust in scaling, filtering and rotation, and has a certain robustness for JPEG compression, cropping and Gaussian noise. The multiplexing capacity and the influence of random phase mask as a key on the quality of reconstructed watermark are also analyzed.

**Key words** holography; quick response code; double random phase encryption; multiple watermark; Laplace decomposition

**OCIS codes** 090.1760; 090.4220; 100.2000; 110.4190

收稿日期: 2017-06-05; 收到修改稿日期: 2017-07-05

基金项目: 福建省教育厅中青年科研项目(JAT160715)、福建省交通厅科研项目(201328)

作者简介: 吴为民(1970—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事信号处理和计算机视觉方面的研究。

E-mail: 237165370@qq.com

\* 通信联系人。E-mail: jiazhen\_chen@fjnu.edu.cn

# 1 引言

当今信息社会,信息技术的高速发展为数字作品的广泛传播提供了便捷的手段,同时伴随着数字作品版权保护问题的出现。数字水印技术因具备安全性、不可感知性和稳健性等特点,成为数字作品版权保护的有效手段,也是当前信息隐藏领域研究的热点问题之一。近年来,QR(Quick Response)码在存货管理、电子票务和移动支付等领域得到了广泛应用,以 QR 码形式表示的版权信息凭借丰富的信息存储能力、快速的识别速度和极小的占用空间,为数字作品提供了更加多元化和更便捷的版权保护方式。光学信息安全技术具有多维、大容量和难以破解等优势,将信息光学中的相关理论和方法引入到数字水印技术研究中已成为目前信息隐藏领域的一个新的研究方向,如虚拟光学信息隐藏<sup>[1]</sup>、双随机相位加密<sup>[2]</sup>、数字全息变换等<sup>[3-4]</sup>。文献[5]对以单 QR 码为版权标识的双随机相位编码数字全息水印方法进行了探讨,利用实值全息编码进行编码后的水印信号大小是原始 QR 码水印信号的两倍,影响了水印嵌入的透明性。

为了扩大水印信号容量并保证良好的稳健性,本文提出一种基于双 QR 码双随机相位加密系统的多重水印方法,与一般基于单图像的双随机相位编码方法相比,所提方法在相同的透明度下可以嵌入更多的水印信息。水印信号的嵌入与宿主文件的拉普拉斯金字塔相结合,水印信号恢复无需原始图像的参与,且利用水印信号可实现盲检测。仿真结果表明:所提出的算法在嵌入更多信息的同时,在缩放、滤波、旋转等方面表现出较好的稳健性,在 JPEG 压缩、剪切、高斯噪声等方面也表现出一定的稳健性。

## 2 基于双 QR 码双随机相位加密系统的多重水印原理

### 2.1 双 QR 码双随机相位加密数字全息原理

#### 2.1.1 数字全息水印信号编码原理

数字全息水印技术中水印信号的编解码借鉴了全息照相术中波面记录与波面再现的成像过程,待编码水印信号相当于光学系统中的原始物光波信号,原始物光波信号在特定的光路系统中经衍射到达观测平面,当观测平面上的衍射光波与原始物光波信号之间满足一定的衍射关系式时,该过程可看作是一种对水印信号的编码过程。为了能够用 CCD 记录观测平面上的复值衍射光波,可以用同轴或离轴的光路形式,CCD 平面上所记录下来的光波信号也称为全息图。与同轴全息相比,离轴数字全息能有效解决孪生像问题,是一种常用的数字全息水印信号编码方案<sup>[6]</sup>。普通光学离轴数字全息中,重建像中除了包含原始和共轭像外,还存在零级像,零级像将对水印信号的重建产生干扰,因此数字全息水印信号的编码一般采用去除零级像的编码方案。全息水印信号编码可表示为

$$W(x, y) = O^*(x, y)R(x, y) + O(x, y)R^*(x, y), \quad (1)$$

式中  $O(x, y)$  表示原始水印信号  $o(x, y)$  的某种光学衍射变换,不同的变换方法对应不同类型的水印信号,如采用傅里叶衍射变换方法生成傅里叶变换水印、采用菲涅耳衍射变换方法生成菲涅耳变换水印等; \* 表示共轭。 $R(x, y)$  表示参考光波,用于对经变换后的水印信号进行调制以形成非负实值全息水印信号,可表示为

$$R(x, y) = R_0 \exp[-2\pi j(ax + by)], \quad (2)$$

式中  $R_0$  为振幅,  $a$ 、 $b$  为载频系数。

经全息编码后的水印信号将包含水印信号的原始像与共轭像分量。在数字域,因调制所形成的原始像或共轭像表现为空间域或空间频率域的循环移位,因此可能造成图像混叠。为了能够从全息水印信号中恢复出不混叠且可分离的原始像或共轭像水印信号,在加入参考光波进行全息编码前需要对原始水印信号进行预处理<sup>[7]</sup>。空间域或空间频率域扩幅补零是一种预处理的基本方法,该方法可使实值编码水印信号的原始像和共轭像在空间域或空间频率域可分离,从而恢复出无解密背景噪声的水印信号。

#### 2.1.2 双 QR 码双随机相位加密原理

数字水印信号设计中,原始信号编码为噪声形式时可获得更好的透明性和稳健性,而虚拟光学加密方法具有多维、大信息量、多自由度、并行数据处理能力等优点<sup>[8]</sup>。为形成噪声形式的水印信号,将双 QR 码与双随机相位编码方法相结合,设计水印信号。双随机相位编码方法由 Refregier 和 Javidi 首次提出<sup>[9]</sup>,通过在输

入平面和傅里叶频谱面各放置一个互不相关的随机相位模板,实现对输入图像的加密。为提高嵌入水印信号的容量,利用计算机编码的灵活性,先将两幅 QR 码图像分别作为复信号的实部和虚部进行组合,再进行双随机相位加密编码,组合后的复信号可表示为

$$o(x, y) = f_{QR1}(x, y) + j f_{QR2}(x, y), \quad (3)$$

式中  $f_{QR1}(x, y)$ 、 $f_{QR2}(x, y)$  分别代表两幅 QR 码图像。

将  $o(x, y)$  作为双随机相位编码系统的输入信号,双随机相位编码系统的输出信号可表示为

$$O(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F} [ o(x, y) R_1(x, y) ] R_2(u, v) \}, \quad (4)$$

式中  $\mathcal{F}$  和  $\mathcal{F}^{-1}$  分别表示傅里叶正、逆变换,  $R_1(x, y)$  和  $R_2(u, v)$  表示两个均匀分布于  $[0, 2\pi]$  的独立白噪声序列。由于空间域与空间频率域随机相位模板的调制,系统的输出信号  $O(x, y)$  将为平稳高斯复噪声信号。设图像大小为  $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ ,  $O(x, y)$  的自相关函数可表示为

$$E [ O^*(x, y) O(x + p_1, y + q_1) ] = \frac{1}{MN} \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{x=0}^{M-1} | f_{QR1}^2(x, y) + f_{QR2}^2(x, y) | \delta(p_1, q_1), \quad (5)$$

式中  $p_1, q_1$  分别为  $x, y$  方向的像素偏离值,  $\delta(p_1, q_1)$  为狄拉克函数。

## 2.2 无解密背景噪声的多重双 QR 码水印信号设计

以双 QR 码形成的复噪声信号为基础,将多个复噪声信号按某种方式复用,得到多重 QR 码全息水印。为了使解密双 QR 码信号无背景噪声,通过频谱面扩幅补零并结合参考光调制的方法产生在空间频率域可分离的多重双 QR 码水印。

多重双 QR 码水印的具体编码过程:

1) 将需要复用的各组双 QR 码加密水印  $O_i(x, y)$  先进行空域插值处理,设频谱面扩展为原来的  $L^2$  倍,则空域插值后的信号可表示为

$$O'_i(p, q) = \text{FFT}^{-1} \begin{bmatrix} \text{FFT} [ O_i(x, y) ]_{MN} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{LM \times LN}, \quad (6)$$

式中 FFT 代表快速傅里叶变换,  $\text{FFT}^{-1}$  代表快速傅里叶逆变换。

2) 用特定角度的参考光  $R_i(p, q)$  对经空域插值后的预处理信号  $O'_i(p, q)$  进行去除零级像全息编码,得到实值全息水印  $H_i(p, q)$  为

$$H_i(p, q) = O'_i(p, q) R_i^*(p, q) + O'_i{}^*(p, q) R_i(p, q), \quad (7)$$

式中  $p = 0, 1, \dots, LM - 1, q = 0, 1, \dots, LN - 1$ 。通过参考光波的角度控制将双 QR 码水印安排在频谱面空间特定位置,从而避免各组双 QR 码水印信号之间的频谱混叠。

3) 通过叠加各组双 QR 码全息实值水印信号,可得到多重 QR 码全息水印,即

$$H(p, q) = \sum_{i=1}^K H_i(p, q), \quad (8)$$

式中  $K$  为所复用的双 QR 码组数。

## 2.3 QR 码有效信息的提取与重组

一个 QR 码的符号结构中包含了与识别有关的功能性区域及与信息有关的编码数据区域,功能性区域具有特定的结构。为了扩大所嵌入水印信号的容量,对水印信号进行编码前,先将外围空白区域、寻像图形、分隔符去除,再将余下的区域重新组合为新的图像,并将其作为双 QR 码双随机相位加密系统的输入信号。

## 2.4 QR 码水印信号重建

水印信号的重建过程是编码的逆过程。首先对  $H(p, q)$  作傅里叶变换,由于采用了空域插值预处理,因此数字频谱面上各组双 QR 码的频谱是可分离的,即各组 QR 码之间不存在解密背景噪声干扰。用窗函数滤出各组 QR 码的频谱后再作傅里叶逆变换,得到经双随机相位加密后的双 QR 码水印信号。对提取的各组双 QR 码加密水印信号使用各自的解密模板作双随机相位解密处理后,将得到由各组双 QR 码有效编码区域组合的复信号,分别从实部与虚部分离出原始 QR 码有效编码区域,结合功能性区域恢复可识别的 QR 码。解码过程可表示为

$$O(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F} [ H(p, q) ] W(u, v) \}, \quad (9)$$

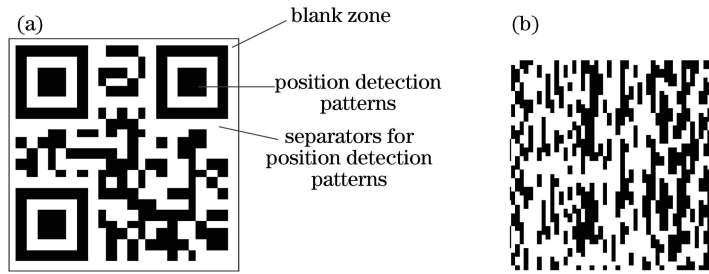


图 1 (a) QR 码结构;(b)重新组合后的图像

Fig. 1 (a) QR code structure; (b) reassembled image

式中  $W(u, v)$  表示滤波窗口。  $O(x, y)$  表示加密后的双 QR 码信号,  $O(x, y)$  的双随机相位解密过程可表示为

$$O_R(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F}[O(x, y)] R_2^*(u, v) \} R_1^*(x, y), \quad (10)$$

式中  $R_1^*(x, y)$  和  $R_2^*(u, v)$  表示随机相位加密模板  $R_1(x, y)$  和  $R_2(u, v)$  的复共轭。  $O_R(x, y)$  表示由 QR 码有效编码区域组合而成的复信号,  $O_R(x, y)$  的实部和虚部可分别表示为

$$f_{QR1}(x, y) = R[O_R(x, y)], \quad (11)$$

$$f_{QR2}(x, y) = I[O_R(x, y)], \quad (12)$$

式中  $R[\cdot]$  和  $I[\cdot]$  分别表示取实部和虚部。通过提取  $O_R(x, y)$  的实部与虚部, 可得到原始 QR 码信号的有效编码区域。将分离出的两个 QR 码有效编码区域与功能性区域相组合, 可恢复出用于扫描识别的 QR 码解密图像。

### 3 水印信号的嵌入与提取

水印信号需要结合宿主文件的特性在权衡透明性与稳健性的基础上进行嵌入与提取, 当宿主图像为一般灰度图像时, 对图像进行拉普拉斯金字塔分解, 得到不同尺度下的残差信息。水印信号与分解后的残差信息的融合具有良好的不可见性<sup>[10-12]</sup>。

#### 3.1 水印信号嵌入步骤

水印信号嵌入步骤如下:

- 1) QR 码信号预处理。预处理包括两个阶段: 首先去除 QR 码功能性区域, 将余下的编码数据区域组合为新图像, 以减少水印信号的数据量; 再对组合后的图像进行像素扩充, 以提高 QR 码的纠错性能, 提高识别率。
- 2) 按第 2 节所述方法为预处理后的图像设计基于双 QR 码的多重水印。
- 3) 对宿主图像进行拉普拉斯金字塔分解, 提取拉普拉斯残差图。
- 4) 在残差图离散余弦变换(DCT)域的中高频分量嵌入水印, 为提高稳健性, 在中高频区域采用冗余嵌入的方式, 经离散余弦逆变换得到嵌入水印后的残差图。
- 5) 利用嵌入水印后的残差图与其他残差图重构原始图像, 得到包含水印信号的宿主图像。

#### 3.2 水印提取过程

水印提取是水印嵌入的逆过程, 具体步骤为: 1) 对含水印的图像进行拉普拉斯金字塔分解, 提取与嵌入相对应尺度下的拉普拉斯残差图; 2) 对拉普拉斯残差图作 DCT, 在 DCT 域的中高频区域提取水印信号; 3) 对提取出的水印按第 2.4 节所述方法重建水印信号, 再通过预处理逆过程恢复重建水印信号的可用于识别的 QR 码水印; 4) 对冗余嵌入的水印按相同的方法重建原始 QR 码, 择优输出。

水印信号的嵌入与提取过程如图 2 所示。

#### 3.3 水印提取质量评价

为了衡量所恢复 QR 水印信号与原始 QR 码水印信号之间的相似度, 可以用相关系数描述<sup>[13-14]</sup>。对于图像  $f_1(m, n)$  和  $f_2(m, n)$ , 归一化互相关系数  $N_C$  为

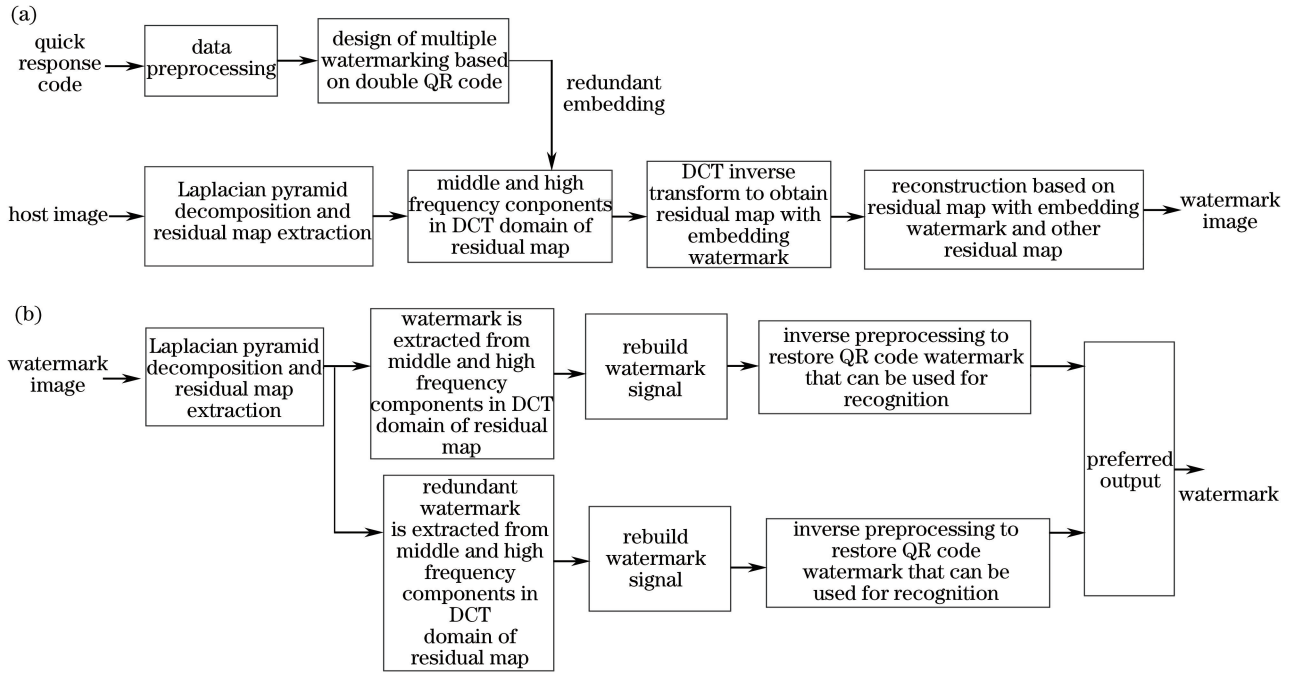


图 2 (a) 水印嵌入过程; (b) 水印提取过程

Fig. 2 (a) Watermark embedding process; (b) watermark extraction process

$$N_C = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M [f_1(m, n) - \overline{f_1(m, n)}][f_2(m, n) - \overline{f_2(m, n)}]}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M [f_1(m, n) - \overline{f_1(m, n)}]^2 [f_2(m, n) - \overline{f_2(m, n)}]^2}}, \quad (13)$$

式中  $\overline{f_i(m, n)}$  为图像  $f_i(m, n)$  的均值 ( $i=1$  和  $2$ )。

水印信号对宿主图像的不可见性可用峰值信噪比 ( $P_{SNR}$ ) 来衡量, 即

$$P_{SNR} = 10 \lg \frac{M \times N \times A^2}{\sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} [f(m, n) - \hat{f}(m, n)]^2}, \quad (14)$$

式中  $A$  为图像的最大灰度值, 对于 8 bit 图像,  $A$  取 255;  $\hat{f}(m, n)$  为嵌入水印后的宿主图像。

## 4 仿真结果与讨论

### 4.1 水印嵌入与提取仿真

仿真中载体图像为 256 色灰度图像, 大小为  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ , 如图 3 所示。原始 QR 码水印信号为分别与字符“福建”、“船政”、“信息”、“工程”相对应的二维码灰度图像, 每个 QR 码大小为  $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ , 如图 4 所示。由 QR 码有效编码区域重新组合而成的水印信号如图 5(a) 所示, 每个图像大小为  $48 \text{ pixel} \times 48 \text{ pixel}$ 。对组合后的水印信号进行像素扩展, 按一个像素点扩展为一个大小为  $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$  的图像块的方法得到图 5(b) 所示的经像素扩展后水印信号, 每个图像大小为  $96 \text{ pixel} \times 96 \text{ pixel}$ 。

将两个有效编码区域图像组合为一个复信号, 将经预处理后的 4 幅图像组合为两个复信号。对每个复信号进行双随机相位编码, 以产生复噪声形式的加密水印信号。将加密后的两个复噪声信号经预处理后加入参考光调制, 得到包含 4 个 QR 码的实值水印信号, 如图 6 所示, 图像大小为  $192 \text{ pixel} \times 192 \text{ pixel}$ 。水印信号的自相关函数如图 7 所示, 自相关函数表现为冲激特性, 表明水印信号具有白噪声的性质。

将水印信号在宿主图像经拉普拉斯分解后的残差图 DCT 域的中高频区域冗余嵌入两次, 当嵌入强度  $\alpha=0.0069$  时, 得到嵌入水印后的宿主图像如图 8 所示。计算水印图像与原始宿主图像的  $P_{SNR}$  为 38.3400, 相似度为 0.9990。由于结合了宿主图像的空间域与空间频率域嵌入水印, 水印信号表现出良好的不可见性。



图 3 宿主图像

Fig. 3 Host image

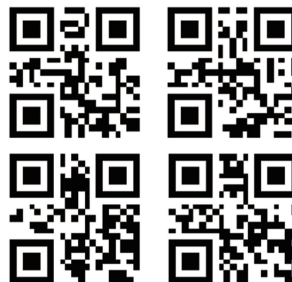


图 4 原始 QR 码水印信号

Fig. 4 Original QR code watermark signal

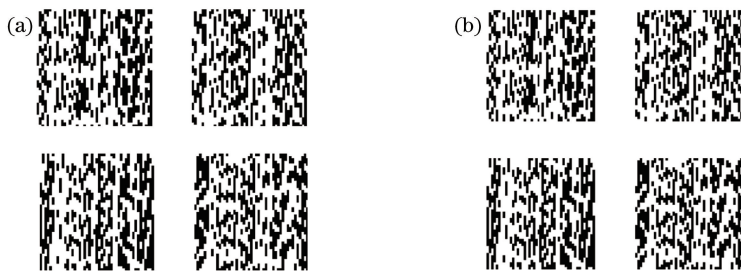


图 5 QR 码信号预处理。(a) QR 码有效编码区域组合后的水印信号；(b)像素扩展后的水印信号

Fig. 5 Preprocessing for QR code. (a) Watermark signal encoded by combination of efficient coding region of QR codes; (b) watermark signal after pixel expansion



图 6 多重 QR 码水印

Fig. 6 Multiple QR code watermark

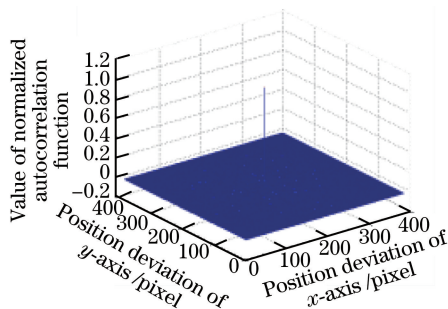


图 7 归一化自相关函数

Fig. 7 Normalized autocorrelation function



图 8 水印图像

Fig. 8 Watermark image

利用嵌入逆过程从水印图像中提取水印信号,结果如图 9 所示。图 9(a)是恢复的 QR 码编码区域信号,图 9(b)是加上功能性区域后所形成的可用于扫描识别的 QR 码信号。经扫描可快速识别出字符“福建”、“船政”、“信息”和“工程”。所恢复的 QR 码水印与原始水印信号之间的相似度分别为 0.9927,0.9926, 0.9931,0.9913,平均相似度 0.9924。重建质量良好,扫描识别过程易实现。

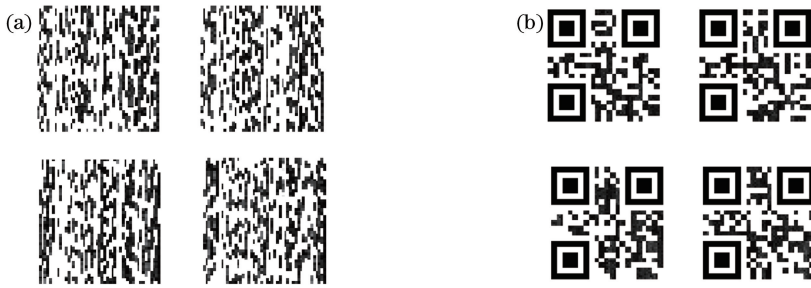


图9 水印信号恢复。(a) QR 码编码区域信号;(b)可用于扫描识别的 QR 码信号

Fig. 9 Watermark signal restoration. (a) Coded region signal of QR codes;

(b) QR code signal for scanning identification

#### 4.2 稳健性测试












对水印图像进行常见攻击测试模拟,QR 码信号恢复结果如表 1 所示。当表 1 中所恢复的 QR 码与原始 QR 码之间的  $N_c$  大于 0.8 时,信号易识别;当  $0.778 \leq N_c < 0.8$  时,信号可识别;当  $N_c < 0.778$  时,QR 码不可识别。

表 1 稳健性测试

Table 1 Robustness test

Attack	Recovered QR code	Average normalized correlation coefficient	Scanning recognition result	Average normalized correlation coefficient in Ref. [10]	Scanning recognition result in Ref. [10]
Resize (50%)		0.9279	Identifiable	0.6597	Unidentifiable
Anti scaling property	Resize (66.6%)	0.9512	Identifiable	0.9475	Identifiable
	Resize (80%)	0.9798	Identifiable	0.9784	Identifiable
Anti filtering performance	Laplacian filtering, alpha: 0.2	0.9867	Identifiable	0.9872	Identifiable
	Log filtering	0.9905	Identifiable	0.9908	Identifiable
	Unsharp filtering, alpha: 0.2	0.9893	Identifiable	0.9896	Identifiable
	Gaussian filtering	0.9901	Identifiable	0.9898	Identifiable

续表 1

Attack	Recovered QR code	Average normalized correlation coefficient	Scanning recognition result	Average normalized correlation coefficient in Ref. [9]	Scanning recognition result in Ref. [9]
Anti JPEG compression performance	Quality: 90 	0.9337	Identifiable	0.8977	Identifiable
	Quality: 70 	0.9052	Identifiable	0.6489	Unidentifiable
	Quality: 50 	0.8300	Identifiable	0.6164	Unidentifiable
Anti Gauss noise performance	Gaussian noise (0.001) 	0.7893	Identifiable	0.7838	Identifiable
Anti Salt & Pepper noise	Salt & Pepper noise (0.002) 	0.8199	Identifiable	0.8275	Identifiable
Anti cropping performance	Cropping (40%) 	0.8069	Identifiable	0.8072	Identifiable
Anti rotation performance	Rotation ( $-60^\circ$ ) 	0.9053	Identifiable	0.9042	Identifiable
Amplitude modulation halftoning coding simulation	 	0.8790	Identifiable	0.8691	Identifiable
Painting attack	 	0.8440	Identifiable	0.8341	Identifiable

### 4.3 安全性分析

在双 QR 码双随机相位加密系统中,水印信号的正确解密与随机相位模板密切相关。正确解密需要在空间域及空间频率域对准模板,在模板对准的基础上再用正确的相位数据解密原始水印信号。用  $\rho$  表示有参数偏差模板下的 QR 码水印重建信号  $f'(x, y)$  与原始 QR 码水印  $f(x, y)$  之间的归一化互相关系数,图 10(a)给出了当模板数据出现偏差时,错误数据率与  $\rho$  之间的关系。图 10(b)是模板存在对齐偏差时,偏差角度与  $\rho$  之间的关系。

从模板数据错误率的角度来看,当空间域相位模板数据错误率超过 40%或空间频率域相位模板数据错误率超过 20%时,所恢复的 QR 码将不可识别;从模板对准的角度来看,当空间域或空间频率域随机相位模板旋转偏差角度超过  $1^\circ$ ,QR 码将不可识别。随着数据偏差的增大,与空间域随机相位模板相比, $\rho$  对空间频率域的随机相位模板更敏感。



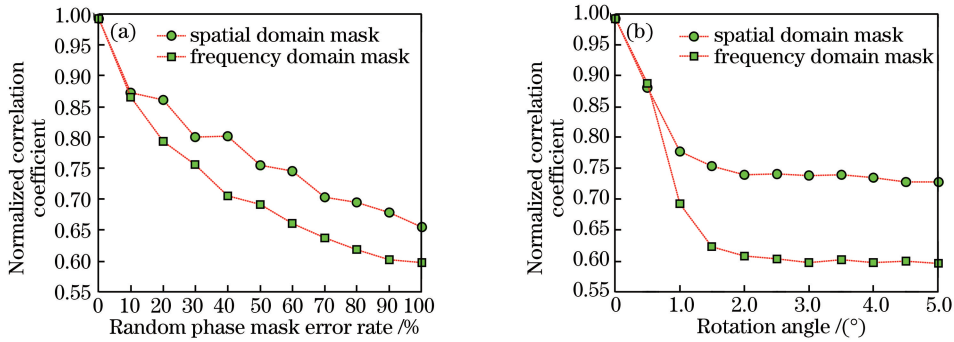


图 10 (a)随机相位模板数据错误率与归一化相关系数;(b)随机相位模板旋转角度与归一化相关系数

Fig. 10 (a) Data error rate of random phase template versus normalized correlation coefficient; (b) rotation angle of random phase template versus normalized correlation coefficient

#### 4.4 复用容量及相关问题分析

设实值水印大小为  $M \times N \times L^2$ ,  $L$  表示频域扩幅倍数, 文献[5]能够容纳大小为  $M \text{ pixels} \times N \text{ pixels}$  的无解密背景噪声的图像数为  $L^2/2$ 。这里采用了先将双图像组合为复信号再进行双随机相位编码加密的方法, 因此所能容纳的图像数量增加一倍, 即能够容纳的原始图像数可达到  $L^2$ 。当图像为 QR 码时, 由于 QR 码功能性区域的去除及重新组合, 所能容纳的 QR 码组数还可进一步增加。将输入图像组合为复信号, 弥补了共轭对称所引起的全息水印信号是原始图像两倍的问题, 而频分复用的多重水印设计中各组复用信号间无解密背景噪声干扰, 意味着相同透明度下可以获得更高的解密质量。设宿主图像大小为  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ , 控制嵌入强度使嵌入水印后的宿主图像(水印图像)与原始宿主图像  $P_{\text{SNR}}$  约为 38 dB 且所提取 QR 码与原始 QR 码之间的  $N_c$  不低于 0.99 时, 文献[5]所允许嵌入的最大实值水印大小为  $192 \text{ pixel} \times 384 \text{ pixel}$ , 不考虑 QR 码像素冗余扩充处理, 若一个  $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$  的图像包含的有效编码区域大小为  $48 \text{ pixel} \times 48 \text{ pixel}$ , 则可嵌入 16 个  $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$  大小的 QR 码。这里所提出的方法在允许嵌入最大实值水印大小相同的情况下, 经双 QR 码设计后所能嵌入的大小为  $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$  的 QR 码水印数量可达 32 个。

去除非编码区域并重新组合为新的水印信号, 该过程打乱了原始二维码的结构, 在一定程度上相当于对原始 QR 码的置乱加密处理, 水印信号在拉普拉斯分解后残差分量的 DCT 域的高频分量中嵌入, 使水印信号具有良好的透明性。此外, 原始水印的像素扩充改善了 QR 码的识别率, 水印信号冗余嵌入改善了单一位置嵌入时在某些攻击下的 QR 码提取质量不佳的问题。与文献[10]中的嵌入方法相比, 该方法改善了抗拉伸和抗 JPEG 压缩的性能。

## 5 结 论

提出一种基于双 QR 码双随机相位加密系统的多重水印方法, 为了扩大水印容量, 将两个 QR 码组合为复信号后进行双随机相位编码, 对编码后的复值信号再应用频分复用的思想实现多个双 QR 的组合, 并同时实现复值到实值信号的编码, 所生成的水印信号具有白噪声的性质, 自相关函数表现为冲激特性。水印信号在宿主文件经拉普拉斯分解后的残差分量中嵌入, 从而达到透明度与稳健性之间的均衡。水印信号复原无需原始图像的参与, 可实现盲检测。仿真结果表明, 该算法具有较高的安全性, 对缩放、滤波、旋转具有较强的稳健性, 在 JPEG 压缩、剪切、高斯噪声、幅度调制半色调等方面也具有一定的稳健性, QR 码形式的水印信号丰富了水印信号的类型, 双 QR 码组合为复信号的水印设计方式提高了水印信号的容量, 也提高了算法的实用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Qin Yi, Wang Hongjuan, Wang Li, *et al.* Virtual optical image encryption based on random amplitude-phase encoding [J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(7): 126-131.

- 秦怡, 王红娟, 王丽, 等. 随机振幅-相位编码虚拟光学加密系统[J]. 光电工程, 2012, 39(7): 126-131.
- [2] Kong Dezhao, Shen Xueju, Zhao Yan, *et al.* Encryption and display of three-dimensional information based computer generated hologram and random phase encoding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 100902.  
孔德照, 沈学举, 赵燕, 等. 基于计算全息和随机相位编码的三维信息的加密与显示[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 100902.
- [3] Luo Jiangtao, Zeng Qingji, Guo Hong, *et al.* Holographic transformation of computer images using computer generated holography[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2002, 13(11): 1171-1173.  
雒江涛, 曾庆济, 郭洪, 等. 利用计算机全息实现数字图像的全息变换[J]. 光电子·激光, 2002, 13(11): 1171-1173.
- [4] Takai N, Mifune Y. Digital watermarking by a holographic technique[J]. Applied Optics, 2002, 41(5): 865-873.
- [5] Liu Zhen, Bai Taotao, Lu Peng. Encrypted holographic watermarking technology with decrypted image superposed no noise[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0209002.  
刘真, 白韬韬, 卢鹏. 一种解密图像无背景噪声的加密全息数字水印技术[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0209002.
- [6] Li Junchang, Xiong Bingheng. Information optics[M]. Beijing: Science Press, 2011: 210-238.  
李俊昌, 熊秉衡. 信息光学教程[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 210-238.
- [7] Chen Jiazhen, Zheng Zihua, Lian Guiren. Digital realization method for Fresnel transform of multiple three-dimensional objects[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 040901.  
陈家祯, 郑子华, 连桂仁. 多三维物体菲涅耳变换数字实现方法[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 040901.
- [8] Peng Xiang, Wei Hengzheng, Zhang Peng. Introduction to optical information security[M]. Beijing: Science Press, 2008: 17-27.  
彭翔, 位恒政, 张鹏. 光学信息安全导论[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 17-27.
- [9] Refregier P, Javidi B. Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding[J]. Optics Letters, 1995, 20(7): 767-769.
- [10] Sun Liujie, Bao Guanxiao, Wang Zuhui, *et al.* Holographic watermarking for anti-image processing based on spatial and frequency domains[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2016, 27(1): 61-66.  
孙刘杰, 包观笑, 汪祖辉, 等. 空间域与频率域相结合的抗图像处理全息水印[J]. 光电子·激光, 2016, 27(1): 61-66.
- [11] Zhou Xiao, Shi Ruizhi, Li Shaomei, *et al.* Dot-recombined hybrid halftoning algorithm based on tone division[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(13): 104-110.  
周啸, 史瑞芝, 李少梅, 等. 一种基于阶调划分的网点重组型复合半色调算法[J]. 包装工程, 2015, 36(13): 104-110.
- [12] Xu Ning, Chen Xuelian, Yang Geng. Research on the algorithm of multiple-image encryption based on the improved virtual optical imaging[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(8): 084202.  
徐宁, 陈雪莲, 杨庚. 基于改进后多维数据加密系统的多图像光学加密算法的研究[J]. 物理学报, 2013, 62(8): 084202.
- [13] Zhao Kai, Huang Yingqing, Jiang Xiaoyu, *et al.* Color computer holography generated by depth and wavelength compensating algorithm[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(6): 0609007.  
赵锴, 黄应清, 蒋晓瑜, 等. 深度和波长补偿算法生成彩色计算全息图[J]. 中国激光, 2016, 43(6): 0609007.
- [14] Wang Jiaojiao, Yu Jia, Liu Huiping, *et al.* Method of color holographic stereogram generation based on Fourier transformation[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(2): 0209001.  
王姣姣, 于佳, 刘惠萍, 等. 基于傅里叶合成全息的彩色全息制作方法[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0209001.