

# 基于二维条码的光学相位防伪掩模设计方法

乌旭\*, 张瑾瑾, 张燕恒

大连海事大学信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026

**摘要** 在分析传统光学相位编码技术特性的基础上,提出了一种可实用化的光学相位防伪掩模设计方法。该方法采用二维条码编码技术,将用于防伪的文本或图像信息编码为二维条码,然后基于传统相位编码技术将该二维条码编码为光学相位防伪掩模。采用较低量化阶数的防伪掩模进行解码后,利用图像形态学相关算法成功恢复出原二维条码的准确编码信息,进而通过二维条码解码得到原始的文本和图像。该设计方法不但有效解决了传统光学相位编码方法的物理实现难题,而且还具有安全性高、成本低、防伪性能好等优点,为推动新一代光学防伪掩模的市场化应用提供了有效的技术途径。

**关键词** 光通信; 光学防伪; 相位编码; 二维条码; 防伪掩模

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.210604

## Design Method of Optical Phase Anti-Counterfeiting Mask Based on Two-Dimensional Barcodes

Wu Xu\*, Zhang Jinjin, Zhang Yanheng

School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China

**Abstract** This paper proposes a practical design method for an optical phase anti-counterfeiting mask based on the analysis of the characteristics of traditional optical phase-coding technology. A two-dimensional (2D) barcode is used to encode text or image information for anti-counterfeiting into a 2D barcode, and then the 2D barcode is encoded into an optical phase anti-counterfeiting mask based on the traditional phase-coding technology. After decoding the anti-counterfeiting mask with a lower quantization order, accurate encoding information of the original 2D barcode can be successfully restored using image morphology-related algorithms, and the 2D barcode is decoded to obtain the original text and image. The proposed design method not only effectively solves the physical implementation problems of traditional optical phase-coding methods but also exhibits the advantages of high security, low cost, and good anti-counterfeiting performance, which provides an effective technical approach to promote market-oriented applications of new-generation optical anti-counterfeiting masks.

**Key words** optical communications; optical anti-counterfeiting; phase coding; two-dimensional barcodes; anti-counterfeiting mask

**OCIS codes** 060.4785; 200.4560; 090.1970

## 1 引言

随着科学技术的快速发展,以压膜全息为代表的传统激光全息防伪性能逐年下降,发展新型光学防伪技术迫在眉睫。1996年,Johnson等<sup>[1]</sup>提出的相位编码技术,是将防伪标识编码为纯相位的光学防伪掩模,该相位掩模具有强度探测器难以感知的优点,难以复制,这为光学防伪技术提供了新的发

展思路。随后的十几年来,围绕相位光学防伪掩模设计,国内外学者提出了包括凸集投影(POCS)算法<sup>[2-3]</sup>、G-S(Gerchberg-Saxton)算法<sup>[4]</sup>、多相位恢复算法<sup>[5]</sup>、级联相位恢复算法<sup>[6]</sup>及基于瞳面差异的相位恢复算法<sup>[7]</sup>等多种优化算法,这些算法在提高系统安全性的同时,改善了解码图像的质量。

但相位防伪掩模技术的研究近些年处于停滞

收稿日期: 2020-02-26; 修回日期: 2020-03-04; 录用日期: 2020-03-08

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(3132019348)

\* E-mail: xuwu@dlmu.edu.cn

状态。制约其发展的根本原因是高清解码图像依赖于相位防伪掩模的高阶相位量化设计<sup>[8]</sup>,而高阶相位掩模的制作受当前器件性能、二元光学制作工艺及制作成本等方面的限制,难以推广使用。

本文在分析传统光学相位编码技术特性的基础上,提出了一种基于二维条码的相位防伪掩模设计方法。该方法的关键是将二维条码作为中间媒介,不但可以将信息量较大的复杂图像和文本等防伪信息在较低相位量化阶数下实现无噪信息恢复,还可实现对文本内容解码信息的编辑。仿真结果

表明,该方法具有较好的防伪性能,为光学相位防伪掩模的技术应用,提供了可实现的技术途径。

## 2 传统光学相位编码技术特性分析

### 2.1 传统光纤相位编码技术原理

以经典的 G-S 算法<sup>[4]</sup>为例,对光学相位编码方法的技术特性进行分析。G-S 算法由 Gerchberg 和 Saxton 于 1971 年提出,用于解决图像处理中相位的恢复问题。应用 G-S 算法求解相位函数的流程如图 1 所示,图中物函数表征防伪标识的光强分布。

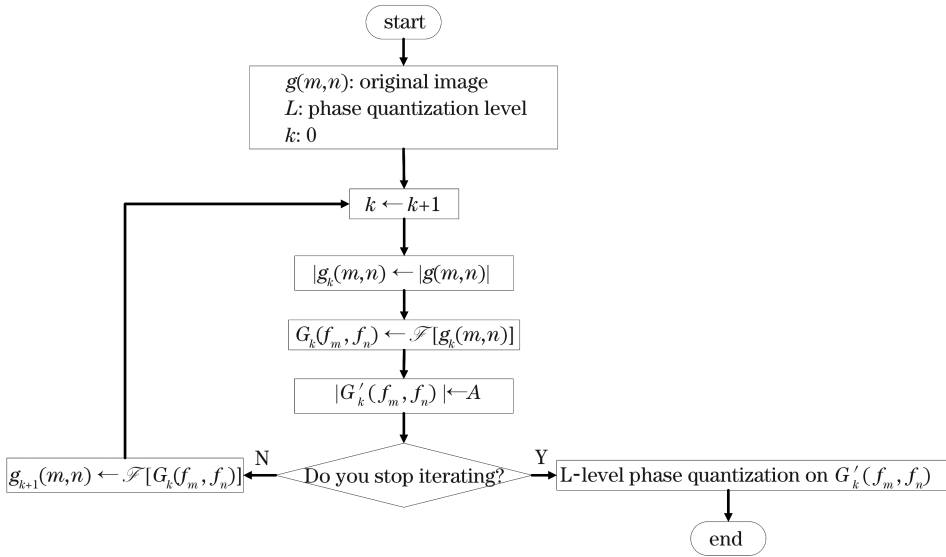


图 1 G-S 算法流程图

Fig.1 Flowchart of G-S algorithm

如图 1 所示,频域上的约束条件为:  $|G'_k(f_m, f_n)| = A$ , 其中  $A$  为常数。 $A$  的取值应使物域和频域的能量相等,即按照 Parseval 定理有

$$\sum_m \sum_n |g(m, n)|^2 = \frac{1}{uv} \sum_u \sum_v A^2. \quad (1)$$

物域上的约束条件为:  $|g_k(m, n)| = |g(m, n)|$ , 即在两个平面内,每次迭代过程中,保留得到的相位,只对振幅进行修改。物域时,振幅改为原图像的振幅,频域时,振幅改为一个常数。

当 G-S 算法在物域和频域同时满足约束条件或在其中任何一个域上满足约束条件时,可以证明,只要约束条件合理,迭代总会收敛。经过  $k$  次迭代后,用迭代后得到的空间域图像  $g'_k(m, n)$  和原图像  $g(m, n)$  的振幅分布标准差来估计所能再现物波的精确度,精确度公式为

$$\sigma^2 = \frac{\sum_x \sum_y [ |g'_k(m, n)| - |g(m, n)| ]^2}{\sum_x \sum_y |g(m, n)|^2}. \quad (2)$$

当相邻两次迭代之差小于定义的精度时,结束迭代。此时,对应的  $G'_k(f_m, f_n)$  的相位函数就是待求取的相位分布函数,通常相位在  $[-\pi, \pi]$  间连续分布,与相应的原始防伪标识是一对傅里叶变换函数。要想获得解码图像,只需将相位分布函数进行傅里叶变换观察强度信息即可。

### 2.2 传统光学相位编码技术特性分析

要想制备光学相位掩模,需要将分布在  $[-\pi, \pi]$  区间的相位分布函数进行均匀量化,量化后的相位分布相比于原始的相位分布,必然会引入相应的量化误差。通常,相位的量化阶数越高,误差越小。为方便讨论,这里采用信号的峰值信噪比 (PSNR) 来评价恢复图像的质量,表达式为

$$P_{SNR} = -10 \lg \frac{\sum_{m,n} (f_{m,n} - g_{m,n})^2}{m \times n}, \quad (3)$$

其中,  $f_{m,n}$  和  $g_{m,n}$  分别为原图像和重构图像,  $m \times n$  为图像对应的像素数。

图 2 给出了不同量化阶数下相位掩模的恢复效

果,表 1 给出不同量化阶数下的 PSNR 值。为了便于比较,原始信息分别选择只具有“黑”、“白”两种灰度级的“Text to be anti-counterfeited”文本信息和灰度细节丰富的 Lena 图像,G-S 算法编码得到的相息图量化结果采用不同灰度值来表征。

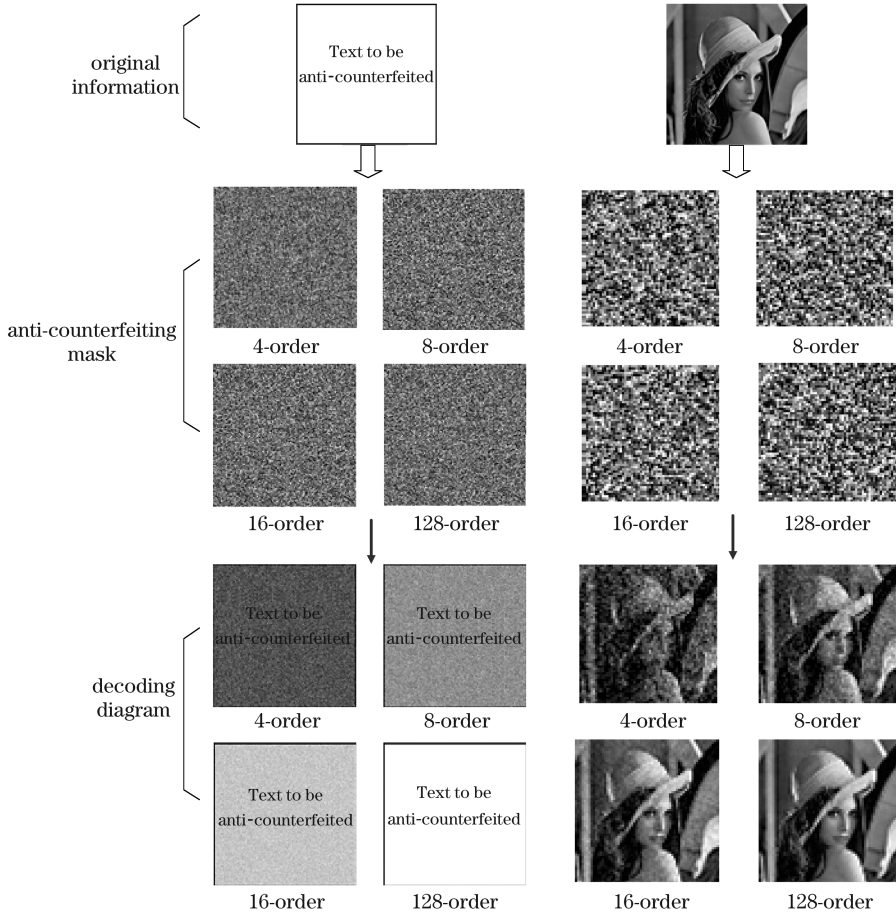


图 2 不同量化编码阶数下的防伪掩模和解码图

Fig. 2 Anti-counterfeiting mask and decoding diagram under different quantization coding orders

表 1 不同量化阶数下的 PSNR 值

Table 1 PSNR values under different quantization orders

Quantization level	4	8	16	128
Text image PSNR value	7.05	10.26	13.69	23.28
Lena image PSNR value	20.13	22.31	24.65	38.16

由图 2 和表 1 可以看出,随着量化阶数的提高,解码图像的恢复质量也随之提高。但对比发现,对于灰度信息较为丰富的图像,量化阶数较高时,恢复质量较好;但在量化阶数较低时,解码得到的图像细节信息被噪声影响,难以达到理想的恢复效果。如果再采用光刻等工艺进行物理制备时,制备过程中引入的误差将导致解码图像质量进一步降

低。这也是目前制约该项技术市场化应用的重要障碍之一。

但从图 2 也可以看出,对于只具有黑白两种灰度的文本信息,当相息图量化阶数选择较低的 4 和 8 时,虽然对应的解码图像峰值信噪比仅达到 7.05 和 10.26,但从解码图中仍可清晰辨识编码的全部信息内容。这主要是由于原始文本信息仅有“黑”、

“白”两种灰度级。在较低量化阶数下,即使恢复的图像信噪比很低,但仍可很好地辨识恢复图像的信息内容。这就为实现光学防伪掩模的设计提供了一种很好的解决思路。

### 3 基于二维条码的光学相位防伪掩模设计

近几年快速发展的二维条码<sup>[9]</sup>,是在平面上利用黑白相间的某种特定的几何图形,按照一定的规律记录数据符号信息的二值图像。在代码编制上使用若干个与二进制“0”、“1”相对应的几何形体来表示文字数值信息。它可以用来储存文本、数据文件、图像等,具有储存容量大、识别速度快、可靠性高、不受设备与时间的限制以及无需依附数据库即可实现扫描解码等优点。

由此可见,采用二维条码技术可以将用作防伪信息的文本或图像编码制作成二维条码,然后将二维条码图形作为 G-S 算法等的输入进行相位编码。如前所述,由于二维条码只具有“黑”、“白”两种灰度级,故可以利用较低量化阶数最终解码得到信息辨识度很高的二维条码灰度图,由于二维条码编码技术本身就具有冗余纠错功能,如果再进一步采用图像处理方法,便可完全实现二维条码的无损恢复,实现最终防伪信息的无损解码。而且经由二维条码解码得到的文本信息,可直接进行编辑和自动识别。较低的相位量化也使得当前光刻制作工艺和

制作成本完全满足相应需求,因此基于二维条码的光学相位掩模设计方法为二维条码技术的推广提供了可能。

在众多二维条码中,常见的码制有:QR Code, Data Matrix, Maxi Code, Vericode, Code 49, Code 16K 等<sup>[10]</sup>。其中快速响应码(QR 码)是众多矩阵式二维条码中的一种,不仅具备二维条码基本的特点,还具有数据密度大、占地空间小、识读速度快等优点。目前,QR 码有 40 个版本,从版本 1 到版本 40,版本越高,储存的数据量就越大。储存数据量与纠错能力也有很大的关系,表 2 列出了 QR 码的纠错等级和纠错能力。

表 2 QR 码的纠错级别

Table 2 Error correction levels for QR codes

Error correction level	Recovery capacity / %
L	7
M	15
Q	25
H	30

从表 2 中可以看出,QR 码的纠错等级越高其纠错能力越强,但是,QR 码在编码过程中会受到容量和纠错等级的相互制约,在实际编码过程中,需要综合考虑容量和纠错率之间的平衡。

图 3 给出了基于二维条码的光学相位防伪掩模的编码框图。相应的解码框图如图 4 所示。

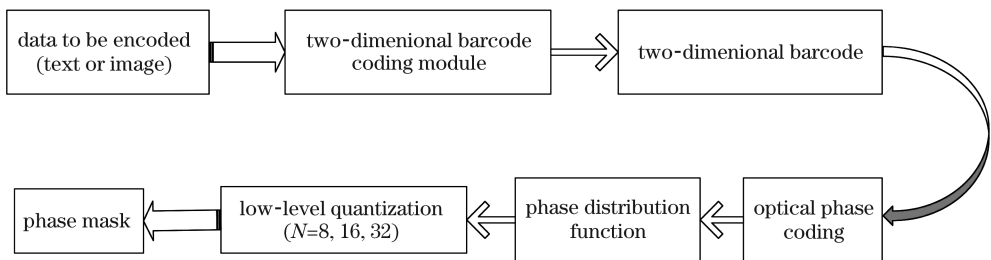


图 3 基于二维条码的光学相位防伪掩模编码框图

Fig.3 Block diagram of optical phase anti-counterfeiting mask encoding based on two-dimensional barcode

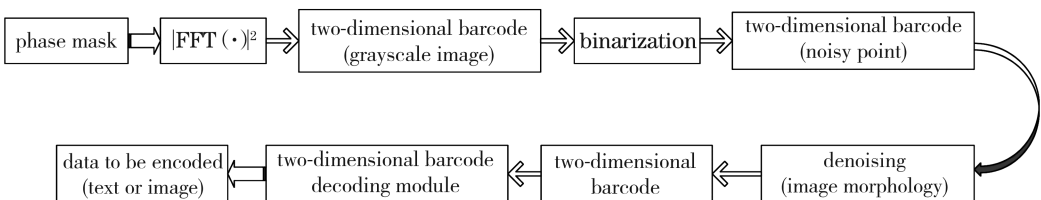


图 4 基于二维条码的光学相位防伪掩模解码框图

Fig.4 Block diagram of optical phase anti-counterfeiting mask decoding based on two-dimensional barcode



图 4 中,相位防伪掩模经傅里叶变换后取平方(实际应用可采用光学傅里叶变换透镜实现傅里叶变换,然后在频谱面采用 CCD 接收即可),得到的二维条码为灰度图,再对其进行二值化得到只有“黑”、“白”两种灰度的二值图,该过程涉及阈值选取问题。根据二维条码的特点,本研究选取最大类间方差法进行阈值选取<sup>[11]</sup>,算法流程如下:

- 1) 求出灰度图的最大灰度  $G_{Max}$  和最小灰度  $G_{Min}$  ;
- 2) 计算出初始阈值  $T_i = (G_{Max} + G_{Min})/2$  ;
- 3) 由  $T_i$  将图像分割为前景和背景,求两者之间的类间方差  $s^2$  和两者平均灰度值  $G_F$  和  $G_B$  ;
- 4) 计算新的阈值  $T_{i+1} = (G_F + G_B)/2$  ;
- 5) 判断类间方差  $s^2$  是否为最大;
- 6) 若  $s^2$  为最大,结束迭代;若  $s^2$  不为最大,则  $T_i = T_{i+1}$ ,继续第 3)步,直到判断  $s^2$  为最大值,结束迭代。求出阈值  $T = T_{i+1}$ 。

流程图如图 5 所示。

在图 4 中,经二值化后的二维条码图像通常会引入若干细小空洞和边缘毛刺等噪声,需要进行去噪处理。解决这类问题的方法有很多,根据二维条码编码图形的特点,本文选用图像形态学中的开运算和闭运算可以很好地解决此类问题<sup>[12]</sup>。其中,开运算是先腐蚀后膨胀的过程,可以消除图像上细小的噪声,并平滑物体边界;闭运算是先膨胀后腐蚀的过程,可以填充物体内部细小的空洞。根据二维条码的特点,选择先闭运算再开运算去噪。减噪后的

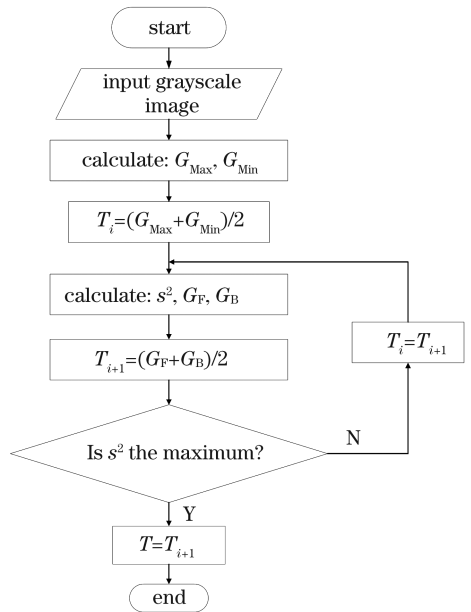


图 5 最大类间方差法求阈值流程图

Fig.5 Flowchart of calculating threshold value by the maximum inter class variance method

二维条码经过解码模块,最终重现原防伪信息。

#### 4 计算机仿真与分析

为了验证所提方法的可行性,本文二维条码编码选择 QR 编码,相位编码算法选择 G-S 算法,进行仿真验证。首先,选取文本信息“Hello World!”作为待防伪文本,按照图 4 编码过程进行仿真。相位量化编码过程,量化阶数选择 8,其仿真结果如图 6 所示。

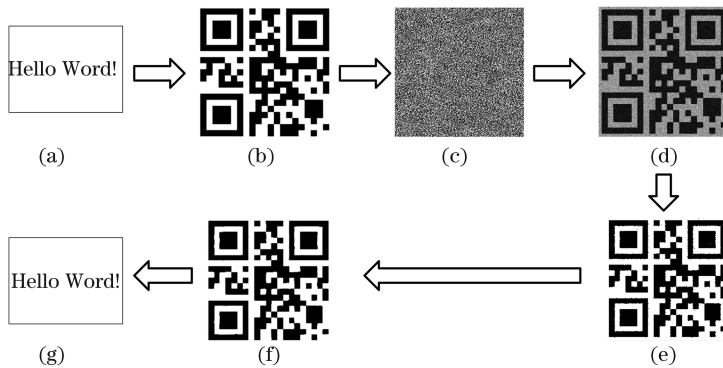


图 6 基于文本信息的光学防伪掩模设计方法仿真验证(量化阶数:8)

Fig.6 Simulation verification of optical anti-counterfeiting mask design method based on text information (quantization order: 8)

编码过程为:

图 6(a)是待编码的文本;图 6(b)是经 QR 编码后得到的二维条码,元素尺寸为  $256 \times 256$ ,纠错能

力选择较低的 L 级;图 6(c)是对二维条码进行相位量化编码后得到的相位防伪掩模。

相应解码过程为:

图 6(d)是按照图 5 所示,对图 6(c)进行傅里叶变换取平方项后得到的 QR 码灰度图;然后对图 6(d)采用最大类间方差法进行二值化处理,得到含有一定噪点的图 6(e);选择图像形态学的先闭运算再开运算进行去噪,由于图像形态学是以形态结构元素来分析图像的,因此结构元素的大小、形状选择,会影响图像的形态运算结果。为了直观地分析结构元素的大小、形状对二值图像减噪的影响,这里选择结构元素大小为(5, 5)、形状为矩形进行操作,得到恢复的 QR 码如图 6(f)所示。经计算,图 6(f)

的解码结果的误码率为 1.46%,远低于编码时选择的纠错能力(7%),因此可准确解码得到与图 6(a)编码信息完全一样的信息,且可编辑,如图 6(g)所示。

为了进一步验证不同量化阶数对误码率的影响,选取 256 pixel $\times$ 256 pixel 的 lena.bmp 灰度图像作为待防伪信息进行实验仿真。二维条码编码仍选择 QR 编码,之后对 QR 码图像分别按照图 4 的编码过程和图 5 解码过程进行编码和解码,量化阶数分别选择 8、16、32 和 64,结果如图 7 所示。计算不同量化阶数下的解码误码率,见表 3。

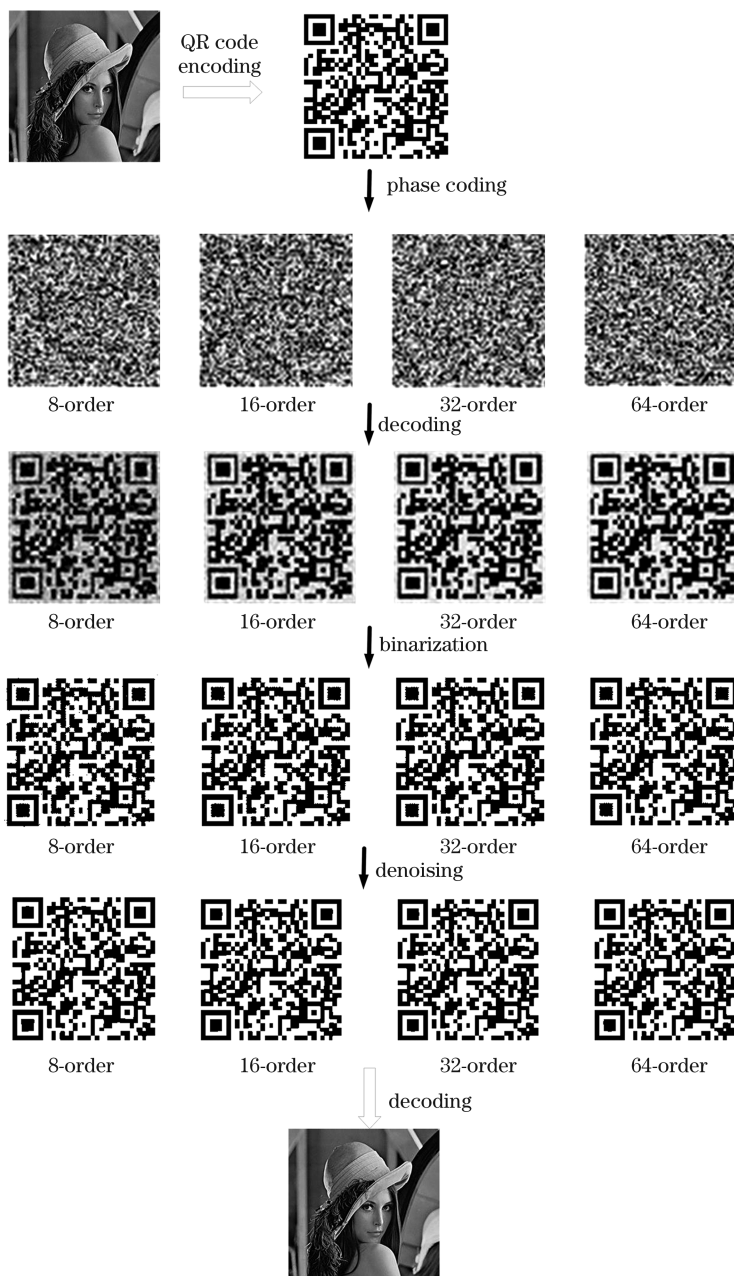


图 7 基于图像信息的光学防伪掩模设计方法仿真验证

Fig. 7 Simulation verification of optical anti-counterfeiting mask design method based on image information

表3 量化阶数选择对误码率的影响

Table 3 Effect of quantization orders on the probability of errors

Quantization level	Number of all elements	Number of errors	Probability of errors / %
8	1024	15	1.46
16	1024	11	1.07
32	1024	5	0.49
64	1024	1	0.10

由表3可知,随着量化阶数的提高,误码率也随之降低,这表明高的量化阶数可以提高解码图像的信噪比。由于在QR码编码过程中采用了纠错编码技术,在低误码率的情况下可直接解码得到原始信息,因此理论上通常量化阶数为8时就能满足防伪要求。在实际制备过程中,考虑过程中引入的误差,可适当提高量化阶数。

## 5 结 论

本文提出的基于二维条码的光学相位防伪掩模设计方法,不仅继承了经典光学相位防伪掩模具有的安全性高、鲁棒性强、防伪性能好的优点,而且由于二维条码技术的引入,设计过程可以在较低量化阶数下就能实现原始编码信息的完全重现,很好地解决了传统光学相位掩模因高量化光学衍射元件难以制作而应用受限的问题,对推动光学随机相位编码技术的市场化应用具有重要意义。

## 参 考 文 献

- [1] Johnson E G, Brasher J D. Phase encryption of biometrics in diffractive optical elements[J]. Optics Letters, 1996, 21(16): 1271-1273.
- [2] Matoba O, Javidi B. Optical retrieval of encrypted digital holograms for secure real-time display[J]. Optics Letters, 2002, 27(5): 321-323.
- [3] Jung S W, Kim T H, Ko S J. A novel multiple image deblurring technique using fuzzy projection onto convex sets [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2009, 16(3): 192-195.
- [4] Wang R K. Random phase encoding for optical security[J]. Optical Engineering, 1996, 35(9): 2464.
- [5] Chang H T, Lu W C, Kuo C J. Multiple-phase retrieval for optical security systems by use of random-phase encoding [J]. Applied Optics, 2002, 41(23): 4825-4834.
- [6] Situ G H, Zhang J J, Zhang Y, et al. A cascaded-phases retrieval algorithm for optical image encryption [J]. Journal of Optoelectronics · laser, 2004, 15(3): 341-343.  
司徒国海, 张静娟, 张艳, 等. 级联相位恢复算法用于光学图像加密 [J]. 光电子·激光, 2004, 15(3): 341-343.
- [7] Li Q, Wu Z, Xu J S, et al. Phase recovery algorithm based on pupil diversity [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0626001.  
李倩, 吴桢, 徐节速, 等. 基于瞳面差异的相位复原算法 [J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0626001.
- [8] Li Y, Kreske K, Rosen J. Security and encryption optical systems based on a correlator with significant output images [J]. Applied Optics, 2000, 39(29): 5295-5301.
- [9] Pavlidis T, Swartz J, Wang Y P. Information encoding with two-dimensional bar codes [J]. Computer, 1992, 25(6): 18-28.
- [10] Wang Y. Two dimensional bar code technology and application and standardization status [J]. China Standardization, 2006(5): 24-25, 28.  
王毅. 二维条码技术应用及标准化状况介绍 [J]. 中国标准化, 2006(5): 24-25, 28.
- [11] Cai C Q, Zhang Y S. Windowed Fourier transform filter method with improved threshold [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 031204.  
蔡长青, 张永山. 改进阈值的窗口傅里叶变换滤波 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 031204.
- [12] Yu Y, Huang W Y. High similarity gray-scale image recognition with modified morphological correlation [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(11): 1362-1367.  
余杨, 黄惟一. 改进形态学相关算法以识别高相似度灰度图像 [J]. 光学学报, 2002, 22(11): 1362-1367.