

三维物体多重菲涅耳计算全息水印与无干扰可控重建方法

陈家祯 郑子华 叶锋 连桂仁 许力

Multiple Fresnel computer-generated hologram watermark of three-dimensional object and its adjustable reconstruction without interference

Chen Jia-Zhen Zheng Zi-Hua Ye Feng Lian Gui-Ren Xu Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 234202 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.234202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.234202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I23>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

对称照明在傅里叶叠层成像中的应用

[Symmetric illumination in Fourier ptychography](#)

物理学报.2017, 66(22): 224201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.224201>

基于叠层衍射成像的二元光学元件检测研究

[Detection of the binary optical element based on ptychography](#)

物理学报.2017, 66(9): 094201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.094201>

无衍射特殊光束的产生与三维表征

[Generation and three-dimensional characterization of complex nondiffracting optical beams](#)

物理学报.2015, 64(24): 244203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.244203>

数字显微全息中记录参数对颗粒测量影响的数值模拟

[Influence of recording parameters on particle field measurement by digital holographic microscopy: a numerical investigation](#)

物理学报.2013, 62(20): 204203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.204203>

数字全息周期像的产生机理及在抑制零级衍射上的应用

[The production mechanism of image periodicity in digital holography and its application in zero-order noise suppression](#)

物理学报.2013, 62(9): 094207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.094207>

# 三维物体多重菲涅耳计算全息水印与无干扰可控重建方法\*

陈家祯 郑子华 叶锋<sup>†</sup> 连桂仁 许力

(福建师范大学数学与信息学院, 福州 350007)

(2017年4月5日收到; 2017年7月5日收到修改稿)

提出了一种基于三维物体的多重菲涅耳计算全息水印方法. 将水印信号作为虚拟三维物体的层面, 首先结合分区复用层析法和菲涅耳双随机相位编码方法产生复噪声形式的水印信号; 然后对水印信号的频谱作共轭对称处理实现实值编码; 为减小对宿主全息图数字重建的影响, 将水印信号的频谱设置于对宿主数字重建影响小的频谱非感兴趣区域; 编码后的信号以一定强度叠加于宿主全息图, 水印信号恢复无需原始宿主全息图信息, 可实现盲提取, 对宿主全息图重建像面的二维码可扫描识别. 仿真测试结果表明, 所提出的方法具有较好的透明性和稳健性, 在宿主全息图遭受滤波、JPEG(联合图像专家小组)压缩、高斯噪声、剪切、旋转等各种攻击的情况下, 不论对宿主还是水印信号仍具有良好的数字重建质量, 对重建像面的二维码仍可扫描识别; 而重建像面水印信号的无干扰可控重建后处理操作解决了不同层面水印信号之间的衍射干扰问题, 提高了水印信号的重建质量. 虚拟光学手段的应用丰富了水印信号设计方法并提升了算法的安全性.

**关键词:** 数字全息图, 菲涅耳衍射, 多重计算全息水印, 数字重建

**PACS:** 42.40.Jv, 42.30.-d, 42.30.Wb, 42.30.Va

**DOI:** 10.7498/aps.66.234202

## 1 引言

数字水印通过在数字图像、音频、视频等数字载体中嵌入秘密信息从而为载体文件提供版权保护、防伪溯源、标识隐藏等功能, 在数据跟踪检测、数据内容篡改鉴定、电子商务认证鉴定等应用领域发挥了积极作用. 目前以数字图像为载体的水印技术得到了广泛而深入的研究<sup>[1-5]</sup>, 但普通照相方法所获得的数字图像是物体以光强形式所呈现的二维平面像, 只记录了物体光波的振幅, 因此数字水印所实施的是物光波振幅的安全保护; 另一方面, 所嵌入的水印信号以单水印为主, 容量较小. 全息照相术用全息图记录物体光波的振幅和相位, 可实现物体的真三维显示. 伴随着电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)等数字成像器件的进步和计算机技术的发展, 目前基于数字全息术的

数字全息图成为三维(3 dimension, 3D)物体的重要信息记录方式, 其应用涉及形貌、变形测量、粒子场测试、数字全息显微、防伪等领域, 并将在未来新型三维全息应用如3D地图、3D导航、全息手机等发挥重要作用<sup>[6-9]</sup>. 数字全息图以记录三维物体物光波全部信息的数字图像方式存在, 如何对承载三维物体信息的数字载体实施安全保护是一个值得研究的问题. 为了实现三维物体的版权保护, 文献<sup>[10]</sup>用相移全息术实现在同轴数字全息图中嵌入三维水印, 但涉及多张宿主及水印全息图; 文献<sup>[11, 12]</sup>分别以相位型和离轴数字全息图为宿主文件嵌入水印, 但都属于单重水印方法, 水印嵌入容量有限. 为了能够使加密后的信号容纳更多的原始图像信息, 文献<sup>[13-15]</sup>分别从分区复用和距离复用角度并结合菲涅耳域双随机相位编码方法提出多图像加密方法, 但分区复用方法中解密图像只

\* 福建省自然科学基金(批准号: 2017J01739)和福建师范大学基金(批准号: I201601004, I201602015)资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: yef279@sina.com

能在重建像面局部空间重建, 而距离复用中因不同距离的菲涅耳衍射因子不满足正交性而造成各层面图像之间衍射干扰严重, 从而降低解密图像的质量. 离轴全息是三维物体常用的一种信息记录方式, 在一张全息图上记录物光和参考光的干涉信息, 离轴全息图序列也是数字全息三维视频显示的重要数据源. 本文以记录三维物体的离轴数字全息图为宿主文件, 应用层析法与菲涅耳域双随机相位编码方法设计多重菲涅耳计算全息水印信号, 噪声形式的水印信号在分析宿主全息图频谱结构的基础上选择嵌入于对宿主重建影响小的非感兴趣 (region of non interest, RONI) 区域, 并可盲提取. 另外宿主三维物体物平面空间结合二维码形式的光波场, 虚拟重建像面重建的二维码还可用手机扫描识别. 对于层析法中所存在的不同层面水印信号之间的衍射干扰问题, 通过重建像面滤波、衍射逆运算、球面波照射虚拟面光源再正向衍射的后处理操作, 实现了在重建像平面的全部区域非插值可控重建所需层面无干扰水印信号. 仿真测试结果验证了所提方法的良好透明性和稳健性, 结合虚拟光学的水印信号设计扩展了水印信号的实现方法, 并且水印重建受多个光学参数的制约, 增强了算法的安全性.

## 2 三维物体离轴数字全息记录与频谱特性

离轴数字全息图的记录光路通过物光和参考光夹角的设置来避免衍射光之间的相互干扰, 是一种最常使用的全息记录方法, 如图 1 所示.

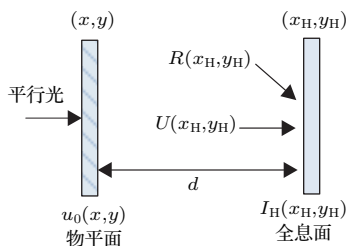


图 1 离轴数字全息光路

Fig. 1. Optical path of off-axis digital hologram.

全息面上记录的光强是物光  $U(x_H, y_H)$  与参考光  $R(x_H, y_H)$  相干涉的结果, 可用公式表示为

$$I_H = |U + R|^2$$

$$= |U|^2 + |R|^2 + R^*U + RU^*. \quad (1)$$

当物面与全息面距离  $d$  满足菲涅耳衍射条件, 物平面光波  $u_0(x, y)$  与全息面物光波  $U(x_H, y_H)$  在数字域满足离散菲涅耳变换关系, 可通过一次快速傅里叶变换或快速卷积方法计算<sup>[16]</sup>. 设参考光波  $R(x_H, y_H) = A_r \exp[j2\pi(\alpha x_H + \beta y_H)]$ ,  $I_H$  的频谱结构可表示为

$$\begin{aligned} F[I_H] &= F(|U|^2 + A_r^2) + F(R^*U) + F(RU^*) \\ &= G_0(f_x, f_y) + A_r G_-(f_x + \alpha, f_y + \beta) \\ &\quad + A_r G_+[-(f_x - \alpha), -(f_y - \beta)], \quad (2) \end{aligned}$$

(2) 式中  $F$  表示傅里叶变换;  $G_0(f_x, f_y)$ ,  $G_-(f_x, f_y)$ ,  $G_+(f_x, f_y)$  分别对应全息图零级像、原始像及共轭像频谱. 原始像或共轭像频谱是宿主三维物体数字重建的关键, 主要频谱分量分别集中于  $(-\alpha, -\beta)$  和  $(\alpha, \beta)$  为中心的区域, 称之为频谱重建 ROI (region of interest) 区域, 用  $S_{ROI}$  表示, 零级像频谱将主要集中于频谱面中心位置, 用  $S_{zero}$  表示, 零级像分量在三维物体数字重建时通常做抑制处理<sup>[17]</sup>. 频谱面其他区域对重建像影响小, 用  $S_{RONI}$  表示. 因此从各频谱分量所在区域位置及与数字重建像之间的关系可将全息图频谱面划分为

$$S_{F(I_H)} = S_{ROI} + S_{zero} + S_{RONI}. \quad (3)$$

频谱面上各区域位置关系如图 2 所示. 当物函数大小为  $N \times N$  点时, 为保证频谱面各像之间不混叠, 频谱面大小至少为  $4N \times 4N$  点, 此时原始像与共轭像频谱分别集中于  $N \times N$  点区域, 零级像频谱区域为  $2N \times 2N$  点, 频谱面其他区域是由于全息记录的特点所形成的冗余区域, 记录了因各像离散傅里叶变换计算后的高频分量.

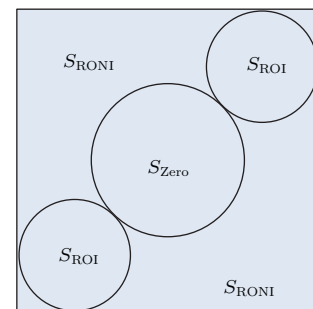


图 2 频谱面区域分布示意图

Fig. 2. Diagram of spectrum area distribution.

### 3 多重菲涅耳计算全息水印设计方法

虚拟光学信息加密是一种常用图像加密方法,信息变换和处理中结合光波传播特点如波长、记录距离、振幅、相位等可以实现数据的多维加密. 综合考虑安全性、大小、复杂度等因素,将层析法与菲涅耳双随机相位编码方法相结合设计多重菲涅耳计算全息水印信号. 层析法将待加密原始水印信号看作三维物体沿深度方向分层的一系列层面,各层面的水印信号经不同距离菲涅耳衍射到达观测平面,观测平面上得到的物光波将是各层面水印信号衍射光波的叠加,是一种通过衍射距离的复用方式,与基于迭代的多重水印方法<sup>[18]</sup>相比,具有计算量小,编解码简单、解密质量高等优点. 由于与不同衍射距离相对应的菲涅耳变换因子不满足正交性,因此在重建像面除了重建出所需层面的水印信号外还存在其他层面水印信号在当前层面所产生的衍射像,对当前层面水印信号的重建效果形成串扰. 为能够充分利用重建像面的全部区域高质量重建所需层面的水印信号,避免其他层面水印信号的串扰问题,根据菲涅耳计算全息水印的特点,在水印信号编码阶段用分区复用的思想在空间上错开各层面水印信号,通过重建像面水印后处理操作,实现在重建像平面的全部区域高质量非插值可控重建所需层面水印信号,解决了距离复用方法中所存在的不同层面水印信号之间的衍射串扰问题,改善了水印信号的重建效果.

#### 3.1 分区复用层析法原理

分区复用层析法的虚拟光学记录光路如图3所示.

水印信号  $f_i(x_0, y_0)$  位于三维物体的不同层面,为避免水印信号在重建像面混叠,图3中位于各层面的水印信号在空间位置上错开,观测平面  $P$  上的物光波  $U(x, y)$  将是各层面物光波经不同距离菲涅耳衍射物光波复振幅之和. 观测平面  $P$  上的物光波可表示为

$$U(x, y) = \sum_{i=1}^N \text{FST}_{d_i}[f_i(x_0, y_0), \lambda], \quad (4)$$

$\text{FST}_{d_i}$  表示距离为  $d_i$  的菲涅耳衍射计算,如(5)式所示,用离散菲涅耳变换可得到数字域衍射计算结果;  $\lambda$  表示光波长,符号  $\sum_{i=1}^N$  代表  $N$  个层面在全息面上的菲涅耳衍射分布之和.

$$\begin{aligned} & \text{FST}_{d_i}[f_i(x_0, y_0), \lambda] \\ &= \frac{\exp(jkd_i)}{j\lambda d_i} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f_i(x_0, y_0) \\ & \times \exp\left\{\frac{jk}{2d_i}[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]\right\} \\ & \times dx_0 dy_0. \end{aligned} \quad (5)$$

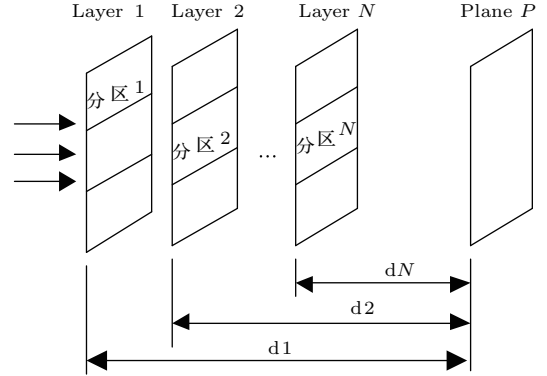


图3 分区复用层析法原理

Fig. 3. Principle of tomography with region multiplexing.

#### 3.2 菲涅耳域双随机相位编码技术

菲涅耳域双随机相位编码技术将双随机相位编码技术<sup>[19]</sup>扩展至菲涅耳域,与双随机相位编码方法相比,除了随机相位模板,两次菲涅耳衍射距离、照明光的波长都可作为系统密钥,进一步增强了系统的安全性. 菲涅耳域双随机相位加密系统<sup>[20]</sup>如图4所示.

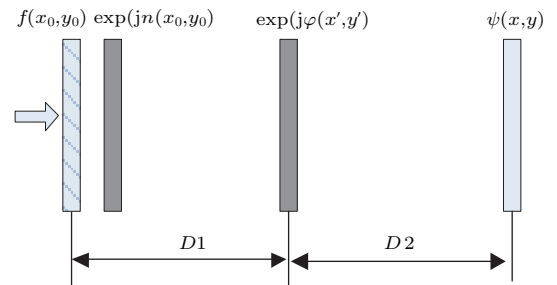


图4 菲涅耳域双随机相位加密系统

Fig. 4. Double random phase encryption system in Fresnel domain.

图4中待加密图像  $f(x_0, y_0)$  与加密后图像  $\psi(x, y)$  之间的关系可表示为

$$\begin{aligned} & \psi(x, y) \\ &= \text{FST}_{D_2}\{\text{FST}_{D_1}[f(x_0, y_0) \exp(jn(x_0, y_0)), \lambda] \\ & \times \exp(j\varphi(x', y')), \lambda\}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $n(x_0, y_0)$ ,  $\varphi(x', y')$  分别表示两个均匀分布于  $[0, 2\pi]$  的独立白噪声序列.

### 3.3 基于分区复用层析法和菲涅耳双随机相位加密多重水印信号设计

多重水印信号通过分区复用层析法与菲涅耳双随机相位编码方法结合实现, 设分布于各层面的水印信号像素大小为  $N_x \times N_y$ , 将层面水印信号  $f_i(x_0, y_0)$  乘以随机相位模板  $n_i(x_0, y_0)$  后计算距离为  $d_i$  的菲涅耳衍射, 各层面菲涅耳衍射叠加得到观测平面 1 上的菲涅耳衍射分布, 观测平面 1 上的衍射光波信号再乘以随机相位模板  $\varphi(x', y')$  做距离为  $D$  的菲涅耳衍射, 从而获得加密后的多重水印信号. 原始水印信号与加密后水印信号之间的关系可表示为

$$\psi(x, y) = \text{FST}_D \left\{ \left\{ \sum_{i=1}^N \text{FST}_{d_i} [f_i(x_0, y_0) \times \exp[jn_i(x_0, y_0)], \lambda] \right\} \exp[j\varphi(x', y')], \lambda \right\}, \quad (7)$$

其中  $n_i(x_0, y_0)$ ,  $\varphi(x', y')$  分别表示分布于  $[0, 2\pi]$  的独立白噪声序列. 经过随机相位模板相乘、菲涅耳衍射、叠加、随机相位模板再次相乘、菲涅耳衍射, 各层面原始水印信号的能量被重新分配, 在加密平面形成平稳高斯白噪声. 并且解密过程除了随机相位模板, 还受到菲涅耳衍射距离、光波长等额外参数的约束, 增加了解密难度. 加密后水印信号  $\psi(x, y)$  的自相关函数可表示为

$$E[\psi^*(x, y)\psi(x+p, y+q)]$$

$$\xi(u, v) = \begin{cases} \eta(u, v) & (u = u_0, \dots, u_0 + N_x - 1; v = v_0, \dots, v_0 + N_y - 1) \\ [\text{flipdn}[\text{fliplr}[\eta(u, v)]]^* & (u = M_1 - u_0 - N_x + 1, \dots, M_1 - u_0; v = N_1 - v_0 - N_y + 1, \dots, N_1 - v_0), \\ 0 & (u = 0, \text{ 或 } v = 0, \text{ 或 } u = M_1/2) \end{cases} \quad (9)$$

水印信号

$$h(x, y) = F^{-1}[\xi(u, v)]. \quad (10)$$

### 4 水印信号的嵌入与提取方法

宿主全息图叠加水印信号过程可表示为

$$h_w(x, y) = h_c(x, y) + \alpha h(x, y), \quad (11)$$

其中  $h_c(x, y)$  和  $h(x, y)$  分别代表宿主全息图及实值多重水印信号,  $\alpha$  为水印嵌入强度.

$$= \frac{1}{(\lambda D)^2} \sum_{x'=0}^{N_x-1} \sum_{y'=0}^{N_y-1} \left| \sum_{i=1}^N \text{FST}_{d_i} [f_i(x_0, y_0) \times \exp(jn_i(x_0, y_0)), \lambda] \right|^2 \delta(p, q). \quad (8)$$

### 3.4 水印信号频谱共轭对称计算全息编码方法

(7) 式所表示的加密后水印信号  $\psi(x, y)$  为复值信号, 采用将频谱共轭对称处理再做傅里叶逆变换的计算全息编码方法<sup>[21]</sup> 获得实值水印. 设宿主全息图频谱面像素大小为  $M_1 \times N_1$ , 实值水印信号频谱面也按相同的大小进行设置, 在水印信号频谱面选择与宿主全息图频谱面 RONI 区域相对应的位置排列复值加密水印信号的原始与共轭像离散频谱, 与空域插值<sup>[22]</sup> 方法相比, 共轭对称的频谱方式排列减小了计算复杂度, 频谱面 RONI 区域对应降低了水印信号对宿主全息图数字重建的影响. 用  $\eta(u, v)$  表示加密水印信号  $\psi(x, y)$  的  $N_x \times N_y$  大小的离散频谱,  $\xi(u, v)$  表示实值编码后水印信号  $M_1 \times N_1$  点的离散频谱, 当水印信号频谱面空间按 (9) 式排列原始与共轭分量, 则离散傅里叶反变换后将获得实值计算全息水印信号  $h(x, y)$ . (9) 式中  $\text{fliplr}$ ,  $\text{flipdn}$  分别表示水平翻转和垂直翻转, \* 表示共轭. 频谱起始点位置  $(u_0, v_0)$  参照宿主全息图频谱面的 RONI 区域进行选择.

水印信号的恢复无需原始宿主全息图信息, 在频谱面用窗函数  $W(u, v)$  提取水印信号原始像或共轭像频谱, 再按水印加密逆过程数字重建各层面水印信号. 水印重建过程可表示为

$$\begin{aligned} & \text{FST}_{-d_i} \{ \text{FST}_{-D} \{ F^{-1} [ F [ h_w(x, y) ] W(u, v) ], \lambda \} \\ & \times \exp(-j\varphi(x', y')), \lambda \} \exp[-jn_i(x_0, y_0)] \\ & = \alpha f_{cs_i}(x_0, y_0) + n(x_0, y_0), \end{aligned} \quad (12)$$

(12) 式中  $\varphi(x', y')$ ,  $n_i(x_0, y_0)$  表示随机相位解密模板,  $f_{cs_i}(x_0, y_0)$  表示代表距离为  $d_i$  层面的水印重建

信号,  $n(x_0, y_0)$  为宿主全息图数字重建 RONI 区域经菲涅耳双随机相位解密后形成的叠加于水印信号上的高斯白噪声.

## 5 实验仿真结果与讨论

### 5.1 嵌入与提取模拟实验结果

为了研究水印信号对宿主三维物体重建的影响, 宿主全息图所记录的三维物体的物面信息结合 QR 码, 考察不同条件下宿主三维物体及水印信号的重建效果. 设宿主三维物体某一物函数平面为“福”字符所对应的二维码灰度图像, 离轴宿主数字全息图的光学模拟记录参数: 全息图取样数  $1024 \times 1024$ ; 物函数宽度 30 mm; 光波长 532 nm; CCD 面阵宽度 4.76 mm; 记录距离 1500 mm; 参考光波

$$R(x, y) = A_r \exp \left[ 0.0214 \frac{2\pi j}{\lambda} (x + y) \right].$$

图 5(a) 表示宿主三维物体的物光波平面, 经扩幅补零至  $1024 \times 1024$  点; 图 5(b) 是宿主物体的离轴菲涅耳数字全息图; 图 5(c) 是宿主全息图的数字频谱图; 图 5(d) 是在衍射距离 1500 mm 处全息图的宿主重建物光场; 图 5(e) 是经像面滤波后的宿主物体数字重建像.

虚拟三维物体的水印层面及随机相位模板如图 6(a) 所示, 大小为  $128 \times 128$  点, 各层面距全息面的距离分别为 1500, 1700, 1900 mm, 光波长设为

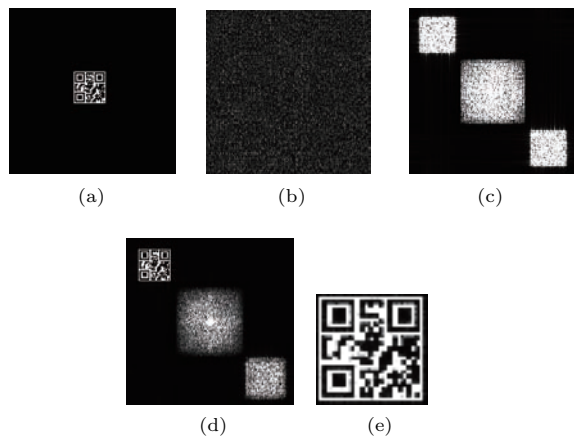


图 5 宿主全息图与数字重建 (a) 物光波平面; (b) 离轴菲涅耳数字全息图; (c) 数字频谱图; (d) 宿主重建物光场; (e) 滤波后宿主物体重建像

Fig. 5. Host hologram and digital reconstruction: (a) Object wave plane; (b) off-axis Fresnel digital hologram; (c) digital spectrum; (d) reconstruction of host object wave; (e) host object wave after filtering.

632 nm; 图 6(b)—(d) 为水印各层面展开后的观察示意图; 按第 3 和第 4 部分所述方法设计噪声形式的实值菲涅耳计算全息水印信号, 如图 6(e) 所示, 大小为  $1024 \times 1024$  点; 图 6(f) 是实值编码计算全息水印信号, 即图 6(e) 的自相关函数, 由于实值水印信号中包含了原始与共轭像分量, 因此存在正负向冲激, 而自相关函数的冲激特性表明了水印信号良好的白噪声特性; 图 6(g) 是从图 6(e) 恢复的各层面水印信号, 对三维物体的某一特定层面, 使用与层面相对应的衍射距离、光波长、随机相位模板等参数可以清晰重建再现该层面上物体信息, 同时重建像面还存在着其他层面水印信号的模糊衍射像, 与三维显示特点相符合. 由于水印信号在各层面的分区复用, 重建像面感兴趣水印信号与衍射像在像面空间不存在混叠现象, 但所需水印信号只在重建像面的局部区域显示, 重建像面空间未能得到充分利用.

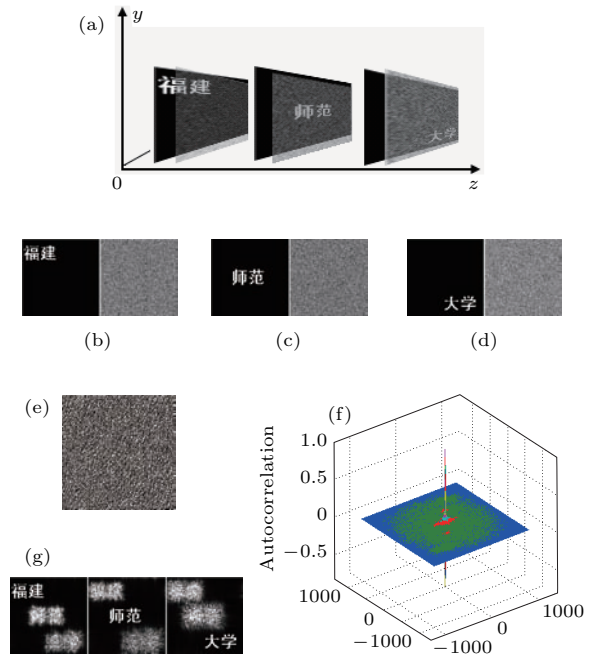


图 6 (网刊彩色) 实值编码全息水印及数字重建像 (a) 水印及随机相位模板; (b) 层面 1 水印及随机相位模板; (c) 层面 2 水印及随机相位模板; (d) 层面 3 水印及随机相位模板; (e) 实值编码计算全息水印; (f) 自相关函数; (g) 各层面重建水印

Fig. 6. (color online) Real-valued holographic watermark and digital reconstruction image: (a) Watermark and random phase mask of layer 1; (c) watermark and random phase mask of layer 2; (d) watermark and random phase mask of layer 3; (e) real-valued computer-generated hologram watermark; (f) auto correlation function; (g) reconstructed watermark of all layers.

模拟实验中设  $\alpha = 0.05$  的嵌入强度, 将水印信号(图 6(e)) 嵌入到宿主数字全息图(图 5(b)), 得到图 7(a) 所示的水印全息图, 从水印全息图再用正确光学重建参数数字重建宿主物光波(图 7(b)) 和各层面水印信号(图 7(c)).

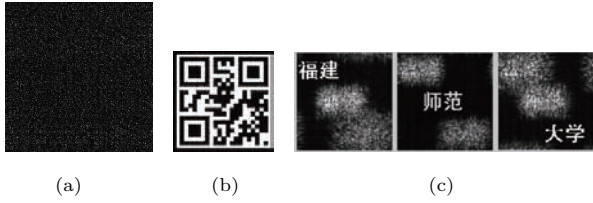


图 7 水印全息图及重建宿主物光波和水印信号 (a) 水印全息图; (b) 重建宿主物光波; (c) 重建水印信号  
Fig. 7. Watermark hologram and reconstructed host object wave and watermark: (a) Watermark hologram; (b) reconstructed host object wave; (c) reconstructed watermark.

宿主全息图(图 5(b)) 与水印全息图(图 7(a)) 之间的 PSNR = 40.4832; 能量归一化均方误差 NMSE = 0.005, 具有较好的不可见性; 水印全息图宿主物函数重建像(图 7(b)) 与原始宿主全息图物函数重建像(图 5(e)) 之间的 PSNR = 71.6094; 相关系数为 1.0000; 水印全息图(图 7(a)) 水印信号重建像(图 7(c)) 与实值编码计算全息水印(图 6(e)) 水印重建像(图 6(g)) 之间的 PSNR = 52.2147; 相关系数为 0.9999.

### 5.2 稳健性测试

对数字全息图, 水印算法的鲁棒性体现在常规操作下水印全息图中宿主物体及各层面水印信号数字再现的鲁棒性. 对水印全息图进行常见攻击模拟, 考察在各类攻击下宿主及水印信号的数字重建效果.

#### 5.2.1 抗滤波性能测试

对宿主数字全息图分别用拉普拉斯高斯算子(Log)、对比度增强滤波算子(Unsharp), Sobel 算子做滤波处理, 得到宿主重建像与水印重建像如图 8 所示, 宿主与水印重建像与原始宿主及水印重建像的 PSNR 与归一化相关系数  $C_N$  如表 1 所列.

#### 5.2.2 抗 JPEG(联合图像专家小组)压缩性能测试

对宿主数字全息图进行 JPEG 压缩, 当压缩因子分别为 50, 70, 90 时, 得到宿主与水印重建像如图 9 所示, JPEG 压缩后 PSNR 与  $C_N$  列于表 2.

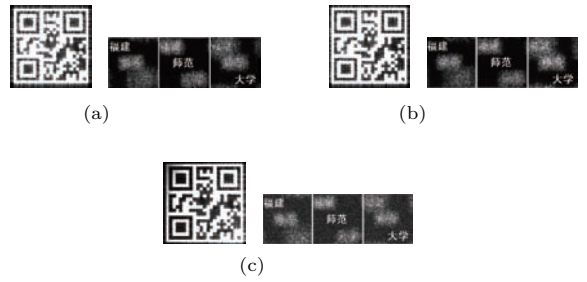


图 8 抗滤波性能 (a) Log 算子滤波后重建像; (b) Unsharp 算子滤波后重建像; (c) Sobel 算子滤波后重建像  
Fig. 8. Anti filter performance: (a) Reconstructed image after Log operator filtering; (b) reconstructed image after unsharp operator filtering; (c) reconstructed image after Sobel filtering.

表 1 宿主及水印重建像与原始宿主及水印重建像之间 PSNR 与归一化相关系数  
Table 1. PSNR and normalized correlation coefficient ( $C_N$ ) between reconstructed image and original reconstructed image for host and watermark.

滤波算子	宿主 PSNR	宿主 $C_N$	水印 PSNR	水印 $C_N$
Log	32.9317	0.9973	38.8831	0.9976
Unsharp	30.9364	0.9956	37.4478	0.9969
Sobel	14.6276	0.8139	20.8150	0.8762

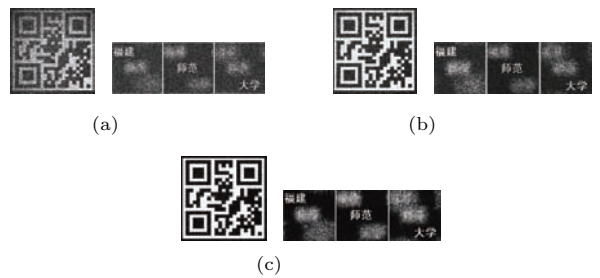


图 9 抗 JPEG 压缩性能 (a)  $Q = 50$ ; (b)  $Q = 70$ ; (c)  $Q = 90$   
Fig. 9. Anti JPEG compression performance: (a)  $Q = 50$ ; (b)  $Q = 70$ ; (c)  $Q = 90$ .

表 2 JPEG 压缩后宿主及水印重建像与原始宿主及水印重建像之间 PSNR 与归一化相关系数  
Table 2. PSNR and  $C_N$  between reconstructed image and original reconstructed image for host and watermark after JPEG compression.

JPEG 压缩因子	宿主 PSNR	宿主 $C_N$	水印 PSNR	水印 $C_N$
$Q = 50$	16.6265	0.8595	17.1789	0.7158
$Q = 70$	21.1512	0.9653	22.7695	0.9202
$Q = 90$	30.4781	0.9963	31.8018	0.9908

#### 5.2.3 抗噪声性能

对宿主全息图分别叠加强度为 0.01 的椒盐噪声及均值 0, 方差分别为 0.01 和 0.005 的高斯噪声,

得到宿主与水印重建像如图 10 所示, 叠加噪声后 PSNR 与  $C_N$  列于表 3.

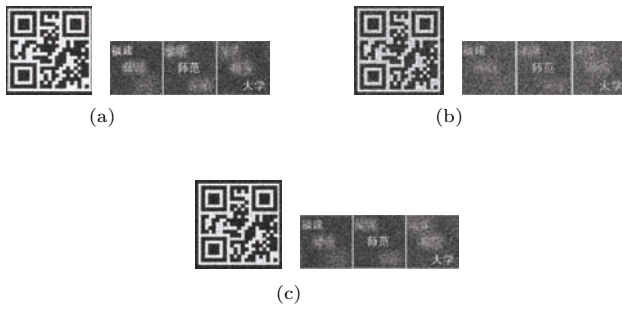


图 10 抗噪声性能 (a) 叠加椒盐噪声后重建像; (b) 叠加均值为 0, 方差为 0.01 Gauss 噪声后重建像; (c) 叠加均值为 0, 方差为 0.005 Gauss 噪声后重建像

Fig. 10. Anti noise performance: (a) Reconstructed image with salt and pepper noise; (b) reconstructed image with gaussian noise(mean value = 0, variance = 0.01); (c) reconstructed image with gaussian noise(mean value = 0, variance = 0.005).

表 3 叠加噪声后宿主及水印重建像与原始宿主及水印重建像之间 PSNR 与归一化相关系数

Table 3. PSNR and  $C_N$  between reconstructed image and original reconstructed image for host and watermark with noise.

噪声类型	宿主 PSNR	宿主 $C_N$	水印 PSNR	水印 $C_N$
椒盐噪声 (0.01)	20.5701	0.9639	16.7115	0.6896
高斯噪声 (均值 0, 方差 0.01)	17.6404	0.9181	13.6957	0.4347
高斯噪声 (均值 0, 方差 0.005)	20.2820	0.9603	16.2411	0.6429

### 5.2.4 抗剪切及旋转性能测试

对宿主全息图分别做 25% 水平剪切、50% 垂直剪切及顺时针旋转 30°, 得到宿主与水印重建像如图 11 所示, 剪切和旋转后的 PSNR 与  $C_N$  列于表 4.

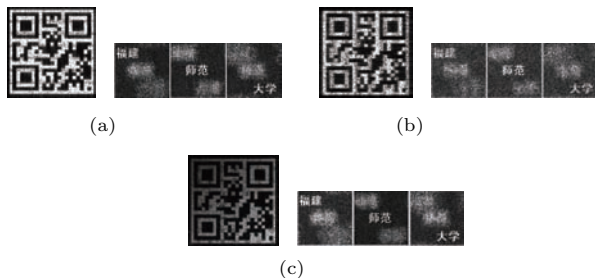


图 11 抗剪切及旋转性能 (a) 25% 水平剪切后重建像; (b) 50% 垂直剪切后重建像; (c) 顺时针旋转 30° 后重建像

Fig. 11. Anti cropping and rotational performance: (a) Reconstructed image after 25% horizontal cropping; (b) reconstructed image after 50% vertical cropping; (c) reconstructed image after 30 degrees clockwise rotation.

表 4 剪切及旋转后宿主及水印重建像与原始宿主及水印重建像之间 PSNR 与归一化相关系数

Table 4. PSNR and normalized correlation coefficient  $C_N$  between reconstructed image and original reconstructed image for host and watermark after cropping and rotation.

剪切及旋转攻击	宿主 PSNR	宿主 $C_N$	水印 PSNR	水印 $C_N$
25% 水平剪切	18.5598	0.9163	22.3717	0.9081
50% 垂直剪切	16.4058	0.8535	17.6260	0.7549
顺时针旋转 30°	14.9846	0.8629	21.0509	0.9061

### 5.2.5 抗量化及零级像抑制性能

对宿主全息图分别做均匀量化及零级像抑制处理, 得到宿主与水印重建像如图 12 所示, PSNR 与  $C_N$  列于表 5.

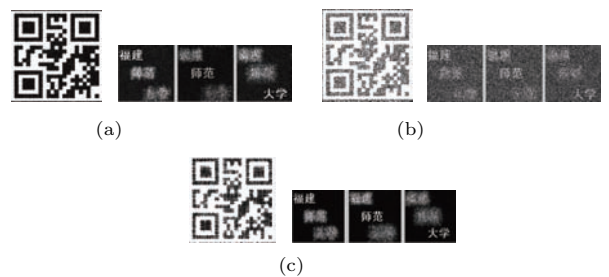


图 12 抗量化及零级像抑制性能 (a) 4 位均匀量化后重建像; (b) 2 位均匀量化后重建像; (c) 零级像抑制后重建像

Fig. 12. Anti quantization and zero image suppression performance: (a) Reconstructed images with 4 bit uniform quantization; (b) reconstructed images with 2 bit uniform quantization; (c) reconstructed image with zero order image suppression.

表 5 均匀量化和零级像抑制处理后宿主及水印重建像与原始宿主及水印重建像之间 PSNR 与归一化相关系数

Table 5. PSNR and  $C_N$  between reconstructed image and original reconstructed image for host and watermark after quantization and zero image suppression.

量化及零级像抑制攻击	宿主 PSNR	宿主 $C_N$	水印 PSNR	水印 $C_N$
4 位均匀量化	29.1093	0.9958	26.7613	0.9662
2 位均匀量化	17.4982	0.9112	14.8225	0.4917
零级像抑制	38.1929	0.9989	35.1240	0.9949

### 5.2.6 错误模板及参数下水印信号重建效果

当水印重建参数或用于解密的随机相位模板错误时, 水印重建像如图 13 所示.

此时重建水印 PSNR 和相关系数分别为 12.7253, 0.2965, 所重建水印信号不可识别.





图 13 错误参数下的水印重建像

Fig. 13. Reconstructed watermark with wrong parameters.

从以上测试结果可以看出, 宿主全息图在遭受滤波、JPEG 压缩、高斯噪声、剪切、旋转、量化等各种攻击的情况下, 不论对宿主还是水印信号仍具有良好的数字重建质量, 对宿主重建像面的二维码仍具有良好的扫描识别特性; 当宿主全息图经零级像抑制, 水印信号仍可检测; 而错误重建参数将导致水印信号无法检出。

### 5.3 实验结果讨论

#### 5.3.1 参数偏差对数字重建的影响

水印信号的重建质量与重建参数密切相关, 当重建参数出现偏差, 水印信号的重建质量将迅速下降, 有偏差参数的水印信号重建过程可以表示为

$$\begin{aligned} & \text{FST}_{-d_i+\Delta d_i} \left\{ \text{FST}_{-D+\Delta D} \left\{ F^{-1} \left\{ F[h_w(x, y)] \right. \right. \right. \\ & \quad \times W(u, v), \lambda + \Delta\lambda \left. \right\} \\ & \quad \times \exp\{-j[\Delta\varphi(x', y')]\}, \lambda + \Delta\lambda \left. \right\} \\ & \quad \times \exp\{-j[\Delta n_i(x_0, y_0)]\} \\ & = \alpha f_{cs_i}(x_0, y_0) + n(x_0, y_0). \end{aligned} \quad (13)$$

图 14(a)—(c) 分别给出了当单一参数如重建距离、波长、或随机相位模板出现偏差情况下所重建的水印信号与无偏差参数恢复的水印信号之间的相关系数。可以看出, 随着单一参数偏差的增大, 所恢复的水印信号与无偏差恢复水印信号之间的相关系数将下降, 而一旦两个或两个以上的重建参数同时出现偏差, 则水印重建信号与无偏差参数恢复的水印信号之间的相关系数值下降急剧, 此时的重建像面的水印信号无法辨识。因此虚拟光学水印加密方法中的重建参数可作为密钥使用。

#### 5.3.2 重建像面水印信号无干扰可控重建后处理

图 7(c) 中重建像面获得的水印信号除了所需层面的水印信号外, 还存在其他层面的水印信号在

当前层面衍射距离处所产生的衍射干扰, 感兴趣水印信号只占据重建像面的局部区域, 即无法利用重建像面的全部区域重建当前层面的感兴趣水印信号。为了能够充分利用重建像面的全部区域重建水印信号, 可以用数学插值方法重建, 但在大放大倍数时插值方法需要用较大数量的像素表示, 计算量大, 特别在显示精细结构时重建像清晰度不够, 由于水印信号的重建过程是观察面物光波到重建像面的衍射计算过程, 因此可利用菲涅耳衍射的特点

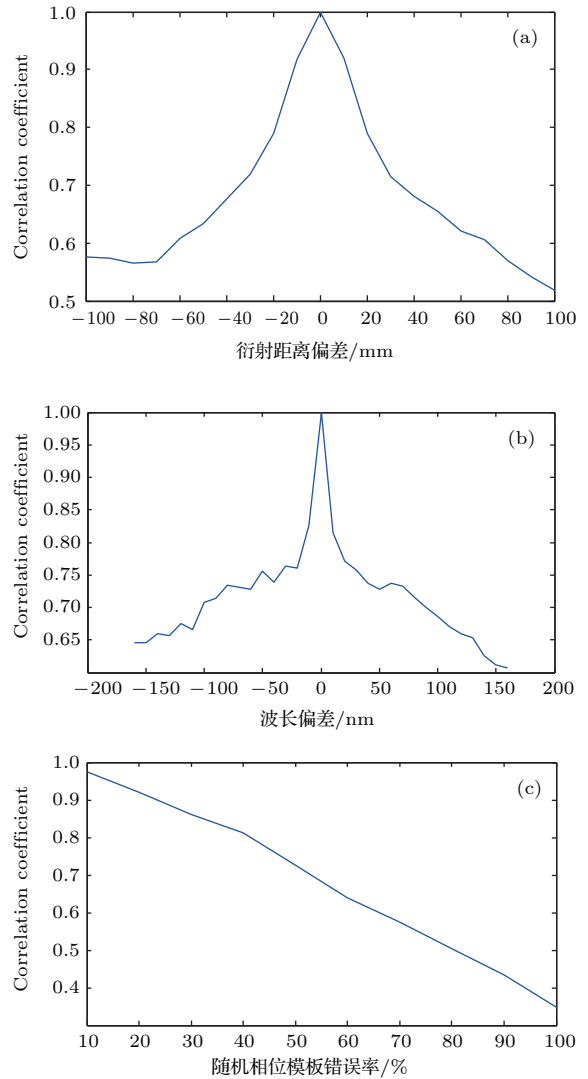


图 14 单一参数偏差对水印信号重建的影响 (a) 衍射距离偏差与相关系数; (b) 波长偏差与相关系数; (c) 随机相位模板偏差与相关系数

Fig. 14. Influence of parameter deviation on watermark reconstruction: (a) Behavior of correlation coefficient versus diffraction distance deviation; (b) behavior of correlation coefficient versus wavelength deviation; (c) behavior of correlation coefficient versus random phase error.

通过像面滤波、逆衍射获得虚拟面光源、球面波照射及正向衍射的水印重建后处理实现基于全息水印平面最大像素数的非插值可控重建<sup>[23]</sup>无干扰水印信号或水印信号的局部,与插值重建相比,计算量小并具有较高的清晰度.以层面1的水印局部信号重建为例,重建过程为:1)在重建像面用窗函数滤出需重建的水印信号;2)将所滤出的水印信号移至重建像面中心,重建像面其余区域为零;3)利用层面1衍射距离 $d_1$ 进行菲涅耳衍射逆运算得到无其他层面水印干扰的虚拟面光源衍射光波;4)虚拟面光源衍射光波乘以球面波后再计算距离为 $(1+\alpha)*d_1$ 的正向菲涅耳衍射得到无干扰的非插值重建水印信号,其中 $\alpha$ 表示放大率.

图15中(a)为层面1原始重建水印信号;图15(b)为经像面滤波并移至重建像面中心的部分水印信号;图15(c)为衍射逆运算后的虚拟面光源衍射光波;图15(d)为放大率为5时的非插值重建水印信号.非插值重建与虚拟光学系统参数有关,通过放大率设置,可在整个重建像面区域重建出不同放大率的水印重建像,对于纹理复杂水印信号,可以观察到局部水印信号的精细结构.为便于插值放大与非插值放大的效果比较,将层面1的水印信号改为图16(a)所示的具有较精细结构的图案,并选择层面1重建像面的一块小区域分别做相同倍数(5倍)双线性插值与非插值放大重建,图17(b)和图17(c)分别给出了两种方式下的重建结果.与插值放大相比,非插值放大重建的线条更清晰.用拉普拉斯能量函数作为图像清晰度评价函数<sup>[24]</sup>,函数值大说明图像更清晰,图17(b)和图17(c)计算结果分别为56476596和57169005.用canny算子做边缘检测,插值与非插值的边缘检测效果分别如

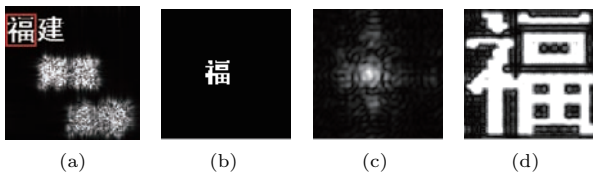


图15 重建像面水印信号非插值可控重建过程 (a)层面1的局部水印信号;(b)像面滤波后的部分水印信号;(c)虚拟面光源衍射光波;(d)非插值放大重建水印信号

Fig. 15. Non-interpolation reconstruction of the watermark signal in the rebuilt image plane: (a) Partial watermark signal of layer 1; (b) partial watermark after filtering; (c) diffracted wave of virtual plane; (d) reconstructed watermark by non-interpolation adjustable magnification.

图17(d)和图17(e)所示,可以看出,非插值方法的边缘宽度较细并且更光滑和鲜明.

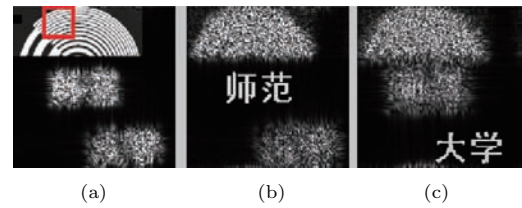


图16 不同层面水印重建像 (a)层面1水印;(b)层面2水印;(c)层面3水印

Fig. 16. Image reconstruction for different layers: (a) Watermark of layer 1; (b) watermark of layer 2; (c) watermark of layer 3.

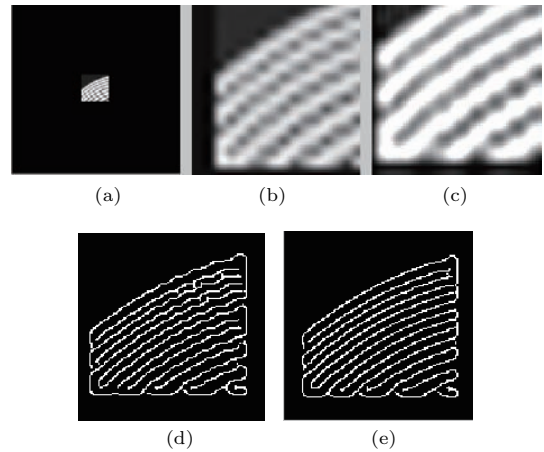


图17 不同插值方式放大效果比较 (a)部分水印信号;(b)双线性插值放大水印信号;(c)非插值放大水印信号;(d)双线性插值放大水印信号边缘;(e)非插值放大水印信号边缘

Fig. 17. Comparison of different interpolation methods: (a) Partial watermark signal; (b) amplified watermark by bilinear interpolation method; (c) amplified watermark by non interpolation method; (d) edges of bilinear interpolation amplification watermark; (e) edges of non interpolation magnification watermark.

### 5.3.3 与文献方法的对比

设原始水印如图18所示,大小为 $128 \times 128$ 点,文献[13]采用距离复用方法,各层面水印内容在空间位置上无须错开,结合菲涅耳域双随机相位编码后所形成的复噪声形式水印信号大小仍为 $128 \times 128$ 点,即重建像面大小为 $128 \times 128$ 点,水印信号在重建像面的全部空间重建,所重建的水印信号大小也为 $128 \times 128$ 点.文献[14]在单一层面上分区复用,为使水印信号在空间上不混叠,需要扩大层面大小,若采用与图18同样大小的水印信号,则水印信号层面至少需 $256 \times 256$ 点,即重建像面空间大小为 $256 \times 256$ 点,但感兴趣水印信号大

小只有  $128 \times 128$  点, 即只占据重建像面局部; 本文方法中将分区复用与距离复用相结合, 因不同层面水印信号分区复用, 水印信号层面的大小至少为  $256 \times 256$  点, 重建像面大小为  $256 \times 256$  点; 感兴趣水印信号大小为  $128 \times 128$  点, 但通过后处理可实现感兴趣水印信号在重建像面的全部空间无干扰可控重建.

为了便于同等条件下的比较, 将文献方法与本文方法中复噪声形式的水印信号大小做相同设置, 即重建面大小统一设置为  $128 \times 128$  点, 并以相同强度嵌入同一载体全息图, 其中载体全息图为图 5 (b), 原始水印如图 18 所示, 嵌入强度  $\alpha = 0.05$ .

用文献 [13] 方法将四个层面的水印信号做双随机相位编码后叠加产生复噪声形式水印信号, 再实值编码后嵌入载体全息图中, 从水印载体恢复水印信号如图 19 所示, 重建水印信号大小为  $128 \times 128$  点.



图 18 原始水印  
Fig. 18. Original watermark.



图 19 距离复用方法水印信号重建像  
Fig. 19. The reconstructed watermark by distance multiplexing method.

按文献 [14] 方法, 先将图 18 中原始水印缩小为  $64 \times 64$  点, 并在单一层面分区复用, 如图 20 (a) 所示, 此时层面大小为  $128 \times 128$  点, 容纳了四幅  $64 \times 64$  点大小原始水印; 该层面信号结合菲涅耳域双随机相位编码产生复噪声水印, 实值编码后嵌入, 所恢复的水印信号如图 20 (b) 所示. 像面滤波后水印重建信号如图 20 (c) 所示, 大小为  $64 \times 64$  点.

将图 18 中原始水印缩小为  $64 \times 64$ , 并四个层面上分区复用, 经菲涅耳域双随机相位编码及实值

编码处理, 嵌入宿主数字全息图, 所重建的四个层面水印信号如图 21 (a) 所示, 此时感兴趣水印信号大小仍为  $64 \times 64$ , 但经像面滤波及水印重建后处理, 水印信号可在重建像面的全部空间无干扰重建, 图 21 (b) 中水印信号大小  $128 \times 128$  点.

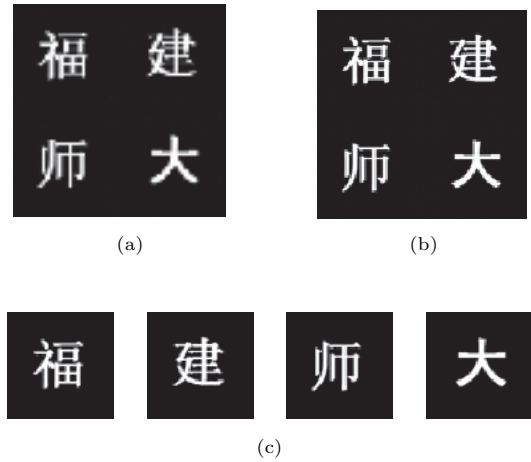


图 20 分区复用方法水印重建信号 (a) 单一层面分区复用; (b) 重建水印信号; (c) 像面滤波后水印信号  
Fig. 20. The reconstructed watermark by region multiplexing method: (a) Region multiplexing in a single layer; (b) reconstructed watermark; (c) watermark after image filtering.

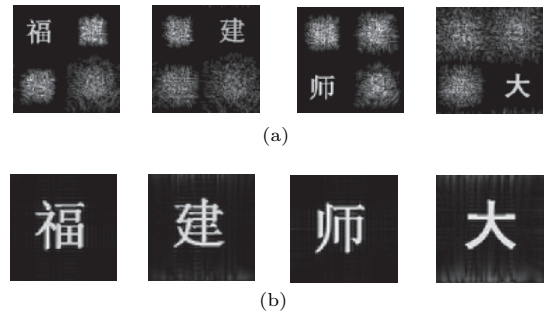


图 21 本文方法水印重建像 (a) 四个层面上的水印重建信号; (b) 经后处理的水印重建信号  
Fig. 21. Reconstructed watermark by our method: (a) Reconstructed watermark in four layers; (b) reconstructed watermark by post-processing.

计算不同方法下水印重建信号与原始水印信号 (图 18) 之间的 PSNR 和  $C_N$ , 如表 6 所列.

表 6 不同方法下的水印重建质量比较

Table 6. Comparison of watermark reconstruction quality under different methods.

文献 [13] 方法		文献 [14] 方法		本文方法	
PSNR	$C_N$	PSNR	$C_N$	PSNR	$C_N$
11.8831	0.6535	19.2025	0.9257	18.4950	0.9166

从不同方法下的水印重建信号及表6中可以看出, 距离复用菲涅耳域双随机相位加密方法的优点在于水印信号的层面大小与原始水印信号大小一致, 但不同层面之间的衍射干扰较严重, 并且重建水印信号质量随着层面数的增加将快速下降; 单一层面上分区复用菲涅耳域双随机相位加密方法通过在层面上错开水印信号避免干扰, 重建水印信号质量较高, 但为了避免水印信号在空间位置上的混叠, 在相同重建像面大小情况下, 所能容纳的水印信号将少于距离复用方法, 并且菲涅耳衍射中不同层面的距离参数未能加以利用, 安全性降低, 另外水印信号只能在重建像面的局部区域重建; 本文通过水印信号在不同层面的分区复用, 相比于距离复用方法, 各层面感兴趣水印信号之间的衍射干扰得以较大幅度降低, 相比于单一层面的分区复用方法, 距离参数参与加密, 安全性提高, 而水印信号后处理解决了分区复用方法中重建像面空间未能得到充分利用的问题. 在稳健性方面, 以抗JPEG压缩性能为例, 图22给出了不同方法下水印重建信号与原始水印信号之间的相关系数, 可以看出, 本文方法与分区复用方法性能相近, 优于距离复用方法.

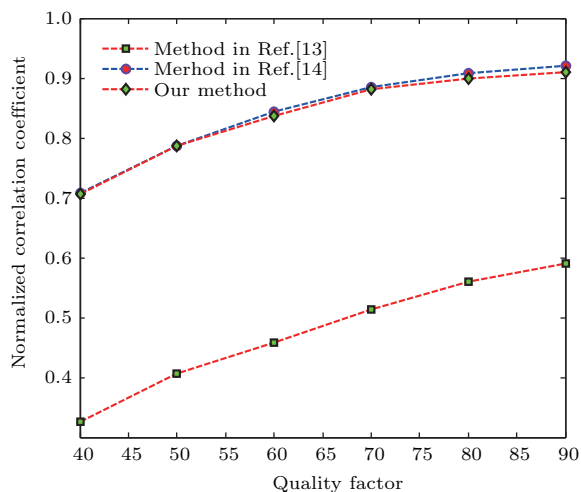


图22 (网刊彩色) 抗JPEG压缩性能比较

Fig. 22. (color online) Comparison of anti-JPEG compression performance.

### 5.3.4 水印设计中的其他问题

#### 1) 水印层数 $N$ 对水印信号的影响

采用分区复用和距离复用, 以及重建像面滤波和非插值重建, 多重全息水印信号大小与层面数  $N$  无关, 即层面数  $N$  的增加不增加水印大小, 水印

层面的大小取决于各层面分区复用中所需容纳的空间无混叠水印大小.

2) 多个层面菲涅耳域双随机相位编码, 水印信号表现为高斯白噪声特性, 自相关函数表现为冲激函数的性质.

3) 对复值加密水印信号用共轭对称计算全息方法编码, 意味着嵌入到宿主全息图的水印存在冗余分量, 利用冗余分量可以改善在某些攻击中水印信号的重建效果.

4) 由于采用逆衍射思想, 像面滤波非插值重建的方法可以观察到水印信号局部精细结构; 适用于水印信号像面滤波及衍射逆运算思想同样适用于宿主全息图的数字重建.

5) 非插值重建与显著图及图像分割<sup>[25]</sup>相结合, 可实现水印信号显著性区域的非插值可控重建.

## 6 结 论

在分析平行光照射离轴数字全息图频谱特性的基础上, 提出将水印信号作为虚拟三维物体的层面, 用菲涅耳域双随机相位编码方法得到噪声形式的水印信号, 水印信号在频谱域经共轭对称嵌入在宿主频谱重建RONI区域, 并实现盲提取. 光学再现模拟测试结果表明, 所提出的方法具有良好的透明性, 并且在对宿主数字全息图进行各种攻击的情况下, 不论是对宿主数字全息图的再现还是对水印信号的再现都表现出良好的稳健性, 对重建二维码仍具有良好的可扫描识别性. 各层面分区复用中层面数与水印信号大小无关, 水印重建像面信号的后处理解决了距离复用方法中不同层面水印信号之间的串扰问题, 可实现水印局部区域的非插值高放大率精细重建. 承载水印信号的载体文件从一般图像扩展到记录有三维物体信息的数字全息图, 扩展了数字水印的应用范围; 虚拟光学手段<sup>[26]</sup>的应用丰富了水印信号的设计方法并提升了安全性.

## 参考文献

- [1] Cox I J, Kilian J, Leighton F T, Shamoon T 1996 *Audio and Video* **3** 243
- [2] Swanson M D, Zhu B, Tewfik A H, Boney L 1998 *Signal Proc.* **66** 337
- [3] Niu X Q, Yang Y X 2000 *Chin. J. Comput.* **23** 21 (in Chinese) [钮心忻, 杨义先 2000 计算机学报 **23** 21]

- [4] Zhong H, Jiao L C 2002 *Chin. J. Comput.* **25** 1364 (in Chinese) [钟桦, 焦李成 2002 计算机学报 **25** 1364]
- [5] Zeng G R, Qiu Z D 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5870 (in Chinese) [曾高荣, 裘正定 2010 物理学报 **59** 5870]
- [6] Chen J S, Chu D 2016 *Appl. Opt.* **55** 127
- [7] Tay S, Blanche P A, Voorakaranam R, Tunç A V, Lin W, Rokutanda S, Gu T, Flores D, Wang P, Li G, St Hilaire P, Thomas J, Norwood R A, Yamamoto M, Peyghambarian N 2008 *Nature* **451** 694
- [8] Li J, Lü X D, Ma M F, Qin Y 2015 *Acta Photon. Sin.* **44** 167
- [9] Zhang T, Yamaguchi I 1998 *Opt. Lett.* **23** 1221
- [10] Kishk S, Javidi B 2003 *Opt. Express* **11** 874
- [11] Tsang P W M, Poon T C, Chow Y T 2015 *Opt. Commun.* **341** 188
- [12] Chen J Z, Zheng Z H, Ye F, Lian G R, Xu L 2015 *Laser Optoelectr. Prog.* **12** 72 (in Chinese) [陈家祯, 郑子华, 叶锋, 连桂仁, 许力 2015 激光与光电子学进展 **12** 72]
- [13] Situ G, Zhang J 2006 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **8** 391
- [14] Xu N, Chen X L, Yang G 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 084202 (in Chinese) [徐宁, 陈雪莲, 杨庚 2013 物理学报 **62** 084202]
- [15] Shi Y S, Zhang J J 2009 *Acta Opt. Sin.* **29** 2705 (in Chinese) [史祎诗, 张静娟 2009 光学学报 **29** 2705]
- [16] Li J C, Xiong B H 2011 *Information Optics* (Beijing: Science Press) p45 (in Chinese) [李俊昌, 熊秉衡 2011 信息光学教程 (北京: 科学出版社) 第 45 页]
- [17] Liu W W, Dai Y Q, Kang X, Yang F J, He X Y 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 856 (in Chinese) [刘雯雯, 戴宜全, 康新, 杨福俊, 何小元 2008 光学学报 **28** 856]
- [18] Shi Y, Situ G, Zhang J 2007 *Opt. Lett.* **32** 1914
- [19] Refregier P, Javidi B 1995 *Opt. Lett.* **20** 767
- [20] Situ G, Zhang J 2004 *Opt. Lett.* **29** 1584
- [21] Huang S J, Wang S Z, Yu Y J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 952 (in Chinese) [黄素娟, 王朔中, 于瀛洁 2009 物理学报 **58** 952]
- [22] Chen J Z, Zheng Z H, Lian G R 2014 *Laser Optoelectr. Prog.* **51** 75 (in Chinese) [陈家祯, 郑子华, 连桂仁 2014 激光与光电子学进展 **51** 75]
- [23] Li J C, Song Q H, Gui J B, Peng Z J, Lou Y L 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 297 (in Chinese) [李俊昌, 宋庆和, 桂进斌, 彭祖杰, 楼宇丽 2011 光学学报 **31** 297]
- [24] Wang H N, Zhong W, Wang J, Xia D S 2004 *J. Image Graphics.* **9** 828 (in Chinese) [王鸿南, 钟文, 汪静, 夏德深 2004 中国图象图形学报 **9** 828]
- [25] Xu Y, Carlinet E, Geraud T, Najman L 2017 *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intellig.* **39** 457
- [26] Refregier P, Javidi B 1995 *Opt. Lett.* **20** 767

# Multiple Fresnel computer-generated hologram watermark of three-dimensional object and its adjustable reconstruction without interference\*

Chen Jia-Zhen Zheng Zi-Hua Ye Feng<sup>†</sup> Lian Gui-Ren Xu Li

(School of Mathematics and Informatics, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

( Received 5 April 2017; revised manuscript received 5 July 2017 )

## Abstract

This paper presents a novel method of generating multiple Fresnel hologram watermarks of three-dimensional objects. Firstly, the original watermark signal is used as the layers of the virtual three-dimensional object, and the encrypted watermark signal is generated in the form of complex noise by using both the region multiplexing tomography and the Fresnel double random phase coding method. Then, the spectrum of the watermark signal is conjugate symmetrically arranged and inverse Fourier transform is performed to obtain the real-valued watermark. The spectrum of the watermark signal is set to be in a non-interested region of the host spectrum to reduce their influence on the digital reconstruction of the host hologram. Finally, the encoded watermark signal is superimposed on the host hologram with a certain intensity. The original host hologram is not required during watermark reconstruction, and blind extraction is achieved. The reconstructed quick response (QR) code from the host hologram can be scanned and identified. The simulation results show that the proposed scheme has good invisibility and robustness to various types of image attacking operations such as filtering, joint photographic experts group (JPEG) compression, Gaussian noise, cropping, and rotation. The proposed method has good digital reconstruction quality for both host hologram and watermark when suffering attacks, and the QR code in the reconstruction plane has good scan recognition. Diffraction interference problem among different watermark layers is solved by the controllable post-processing of the watermarks with adjustable reconstruction and no interference, and the watermark reconstruction quality is improved. Furthermore, the application of virtual optics enriches the watermarking signal design method and enhances the security of the algorithm.

**Keywords:** digital hologram, Fresnel diffraction, multiple computer-generated hologram watermark, digital reconstruction

**PACS:** 42.40.Jv, 42.30.-d, 42.30.Wb, 42.30.Va

**DOI:** [10.7498/aps.66.234202](https://doi.org/10.7498/aps.66.234202)

---

\* Project supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province, China (Grant No. 2017J01739) and the Foundation of Fujian Normal University, China (Grant Nos. I201601004, I201602015).

† Corresponding author. E-mail: [yef279@sina.com](mailto:yef279@sina.com)