

基于叠层衍射的数字水印算法研究

刘祥磊 潘泽 王雅丽 史祎诗

Watermarking algorithm based on ptychographical imaging

Liu Xiang-Lei Pan Ze Wang Ya-Li Shi Yi-Shi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 234201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.234201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I23>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用液芯柱透镜快速测量液相扩散系数-折射率空间分布瞬态测量法

Rapid measurement of the diffusion coefficient of liquids using a liquid-core cylindrical lens: a method for analysing an instantaneous diffusive picture

物理学报.2015, 64(11): 114205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114205>

基于太赫兹时域光谱技术的伪色彩太赫兹成像的实验研究

False-color terahertz imaging system based on terahertz time domain spectroscopy

物理学报.2015, 64(11): 114206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114206>

可见光域多波长叠层衍射成像的实验研究

Experimental study on multi-wavelength ptychographic imaging in visible light band

物理学报.2015, 64(8): 084203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084203>

基于分块速度域改进迭代运动目标检测算法的红外弱小目标检测

A block-based improved recursive moving-target-indication algorithm

物理学报.2014, 63(7): 074208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.074208>

基于数字全息及复用技术的全场偏振态测试方法

Full-field detection of polarization state based on multiplexing digital holography

物理学报.2013, 62(22): 224204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.224204>

## 基于叠层衍射的数字水印算法研究\*

刘祥磊<sup>1)2)</sup> 潘泽<sup>1)2)</sup> 王雅丽<sup>1)</sup> 史祎诗<sup>1)2)3)†</sup>

1)(中国科学院大学, 北京 100049)

2)(中国科学院光电研究院, 北京 100094)

3)(中国科学院信息工程研究所, 信息安全国家重点实验室, 北京 100093)

(2015年6月17日收到; 2015年8月3日收到修改稿)

基于叠层衍射成像原理提出了一种新的衍射数字水印算法: 叠层水印. 通过双随机相位编码和探针, 实现对水印图像的分块加密, 密文经过衰减处理, 加载在振幅型宿主图像的空域上, 伪探针记录下宿主图像, 并加载到传输图像的相位上. 模拟实验结果表明: 首先, 叠层水印可以很好地提取水印图像的振幅、相位信息. 其次, 叠层水印可以解决水印不可感知性与密文信息提取质量之间的矛盾. 最后, 通过鲁棒性研究验证了: 叠层水印具有很好的抗噪声和抗剪切能力, 并且可以通过增加探针的数目和交叠率进一步提高其鲁棒性, 并给出其在 GIF 图像上的应用.

**关键词:** 叠层衍射, 双随机编码, 数字水印, 鲁棒性

**PACS:** 42.30.-d, 42.30.Rx, 42.25.Fx

**DOI:** 10.7498/aps.64.234201

## 1 引言

基于光学理论与方法的图像加密、隐藏和水印技术越来越受到人们关注<sup>[1-17]</sup>. 其中, Takai等<sup>[1]</sup>将光学全息概念应用到数字水印中, 提出了数字全息水印, 但由于只需作傅里叶逆变换, 就能够解出水印信息, 因而其安全性较低. Kishk和Javidi<sup>[2-4]</sup>将双随机相位编码用于图像隐藏和数字全息水印, 可用于二维或三维物体隐藏和水印, 安全性能得到了提高, 但该方法水印提取质量与不可感知性矛盾, 鲁棒性有待进一步提高, 因而限制了其实用性. 近几年, 基于鬼成像<sup>[5]</sup>、衍射成像<sup>[6]</sup>和相移数字干涉<sup>[7]</sup>的光学加密技术, 以及叠层衍射成像技术<sup>[8]</sup>在光学加密上的应用, 为水印技术带来了新的思路.

本文将叠层衍射成像<sup>[18-25]</sup>应用到数字水印领域, 提出叠层水印. 首先, 叠层水印可以提取复振幅类型的水印图像, 并且使用的双随机相位因子

和探针密钥增强了系统的安全性<sup>[8]</sup>. 其次, 叠层水印通过引入伪探针解决了水印不可感知性与提取质量之间的矛盾. 伪探针具有记录未知宿主图像的功能, 提取水印图像时, 使用传输图的振幅信息, 减去传输图像相位信息, 即可获得被加密的水印信息. 再结合叠层重构算法, 精确提取出水印图像. 这使得水印提取质量与衰减系数 $\alpha$ 无关, 换句话说, 水印提取质量与水印不可感知性无关, 因为衰减系数 $\alpha$ 直接影响水印的不可感知性. 因此, 叠层水印解决了水印不可感知性与提取质量之间的矛盾. 最后, 鲁棒性研究表明: 叠层水印具有很好的抗噪声和抗剪切能力, 并且可以通过增加探针的数目和交叠率, 进一步提高其鲁棒性. 从信息嵌入量与鲁棒性角度考虑, 可以得出: 叠层衍射得到的层与层之间的密文信息, 存在重叠或冗余, 等价于提高了信息的嵌入量; 同理, 当探针数目或者交叠率增加时, 信息的嵌入量也会进一步增加, 则鲁棒性也进一步增强. 当要求使用多张传输图像时, 叠层水印可以

\* 国家自然科学基金(批准号: 61575197, 61307018)、国家杰出青年科学基金项目(批准号: 61225024)、中国科学院优博论文启动基金、中国科学院大学校长基金、中国科学院科教结合项目和香港王宽诚教育基金会资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [sysopt@126.com](mailto:sysopt@126.com)

很好地应用在 GIF 图像水印.

## 2 实验原理与算法设计

### 2.1 实验原理

叠层水印的光路系统如图 1 所示: 系统的主体是一个 4F 系统. 沿着光路平行光入射, 输入面为探针 probe1—4、水印图像以及与其紧贴的 M1. M2 位于频谱面上, 4F 系统的输出面为衰减器和宿主图像. 图中 M1, M2 是随机相位板, 即经过 M1, M2 后光强不变而相位随机延迟, 延迟大小为  $0-2\pi$ .

整个系统又可看作两个功能装置组成: 加密装置与嵌入装置. 位于衰减器之前的装置为加密装置. 加密装置会对水印图像进行加密处理, 得到的密文是统计独立的随机白噪声 [8]. 嵌入装置将得到的密文经过衰减器处理, 加载到宿主图像空域上, CCD 记录振幅. 这里, 水印图像可以为复振幅图像. 实验步骤及对应数学表达如下.

**步骤 1** 选择探针形状和移动方式 [16]. 图 1 中的探针 probe1—4 颜色区域代表不透光区域, 白色区域表示完全透光; 不同颜色仅代表使用次序不同. 相邻 probe 照射区域存在重叠, 这满足叠层衍射成像的核心要求. 需要注意的是文中 probe1—4、水印图像、M1 和 M2 有效的采样点数均为  $256 \times 256$  pixels; 伪探针和宿主图像有效的采样点数为  $512 \times 512$  pixels.

**步骤 2** 根据水印图像大小选择宿主图像大

小, 保证每次得到的密文信息可以加载在宿主图像的区域不重叠. 一般要求宿主图像的尺寸大于等于水印图像尺寸乘以探针数目. 当然, 对于要求使用多张传输图像时, 可以不满足该要求.

**步骤 3** 按图 1 搭建光路, 记录成像. CCD 记录的是携带密文信息的宿主图像信息. 探针位置每改变一次, 宿主图像位置相应改变一次, CCD 记录一次, 对应的表达式为

$$E_i = \text{FT}\{\text{FT}\{(f_0 \cdot p_i) \cdot \exp(jM_1)\} \times \exp(jM_2)\}, \quad (1)$$

$$T = E_i \cdot \alpha + C. \quad (2)$$

**步骤 4** 在 4F 系统的输入面上添加伪探针, 如下式:

$$P = 1 \cdot \exp(-jM_1). \quad (3)$$

**步骤 5** 伪探针经过系统后 CCD 记录成像, 如下式:

$$E = \text{FT}\{\text{FT}\{P \cdot \exp(jM_1)\} \cdot \exp(jM_2)\}, \quad (4)$$

$$T' = E \cdot \alpha + C. \quad (5)$$

**步骤 6** 将 CCD 记录的 5 张图像即分别使用探针 probe1—4 记录的图像和使用伪探针记录的图像, 通过计算机首先将探针 probe1—4 得到的图像整合成一张完整的图, 再将使用伪探针得到的图像放到这幅图像的相位上, 如下式:

$$T_r = T \cdot \exp(i \cdot T' - i \cdot \alpha), \quad (6)$$

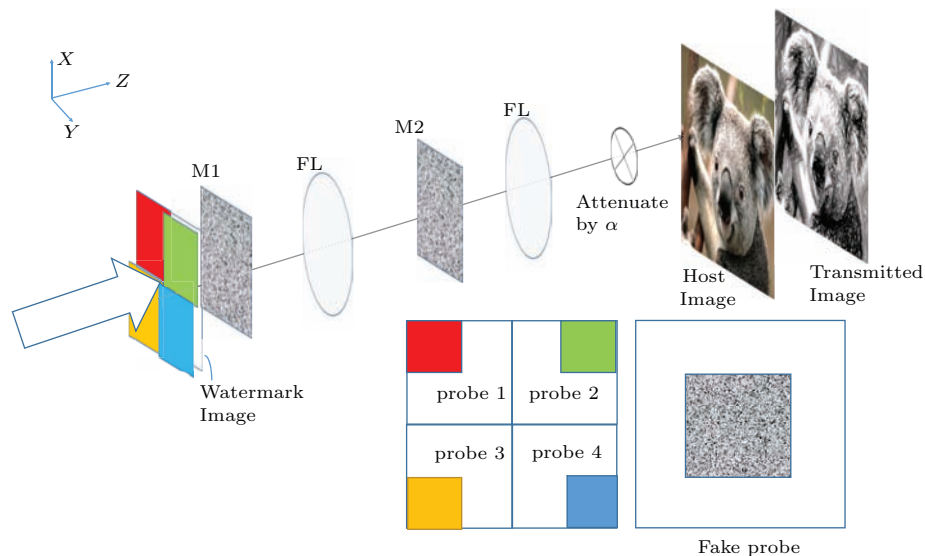


图 1 (网刊彩色) 叠层水印的实验装置

Fig. 1. (color online) Schematic of optical watermark via ptychography.

式中,  $FT\{\}$  分别表示傅里叶变换操作,  $f_0$  为水印图像的函数表达式,  $P_i$  为第  $i$  个指针,  $i = 1, 2, 3, 4$ .  $\alpha$  为衰减系数 ( $0 < \alpha < 1$ ),  $C$  为宿主图像的函数表达式,  $T$  传输图像的振幅.  $P$  为设计的伪探针函数,  $T'$  为传输图像的相位.  $T_r$  为我们最终得到的传输图像.

### 2.2 算法设计

从传输图像提取水印图像, 是加密与嵌入的逆过程. 所以提取水印图像的第一步就是将传输图像中的密文信息分离出来. 在提取的过程中, 宿主图像信息相当于一种噪声 [2], 因此分离情况的好坏, 往往影响水印图像的提取质量. 叠层水印通过引入伪探针可以完全分离出密文信息, 这就会消除宿主图像对于水印图像提取质量的影响. 提取水印图像的第二步是将得到的密文信息结合叠层重构算法解密, 提取出水印图像. 密文信息实质上是相互重叠的衍射强度信息, 它们之间存在相互约束关系, 水印信息就是所有衍射图样的公共解, 故水印图像的复振幅是可以被精确地重构出来的. 提取算法的具体步骤如下:

**步骤 1** 假设嵌入水印图像的复振幅为  $f_g$ .

**步骤 2** 使用第  $i$  个探针照射物体, 其中  $i = 1, 2, 3, 4$ :

$$E_{ig} = FT\{FT\{P \cdot f_g \cdot \exp(jM_1)\} \times \exp(jM_2)\}. \quad (7)$$

**步骤 3** 使用传输图像的振幅信息减去相位信息即  $T$  减去  $(T' - \alpha)$ , 适当的放大, 得到加密信息, 再保留 (7) 式所得相位, 可得

$$D_{ig} = \frac{(T - T' + \alpha)}{\alpha} \cdot \frac{E_{ig}}{|E_{ig}|}. \quad (8)$$

**步骤 4** 将 (8) 式所得复振幅逆向返回物品表面, 其中  $k$  表示第  $k$  次迭代,  $n$  表示产生新的复振幅.

$$f_{ign}^k = FT^{-1}\{FT^{-1}(D_{ig}) \cdot \exp(-jM_2)\} \times \exp(-jM_1). \quad (9)$$

**步骤 5** 再次修正复振幅

$$f_{(i+1)g}^k = f_g + \beta \cdot \frac{P_i}{P_i + \gamma} \cdot (f_{ign}^k - P_i \cdot f_g), \quad (10)$$

其中  $\beta, \gamma$  为调节因子,  $\beta$  是一个反馈系数, 用于迭代校正,  $\gamma$  是为了保证分母不为零.

**步骤 6** 用  $f_{(i+1)g}^k$  作为初始值, 使用  $i + 1$  个照明探针重复步骤 2 到步骤 5 的计算, 依此类推, 直到将第 4 个照明探针的情况计算完毕.

**步骤 7** 计算重建图像与嵌入图像的相关系数  $C_o$ .  $C_o$  是评价两个分布函数相似程度的量化指标, 取值范围为  $[0, 1]$ ,  $C_o$  值越接近 1, 表明两个函数的分布形式越相近.  $C_o$  的表达式为

$$c_o(f, f_0) = \text{cov}(f, f_0) (\sigma_f \sigma_{f_0})^{-1}, \quad (11)$$

其中,  $f$  和  $f_0$  分别为恢复图像和水印图像的复振幅  $\text{cov}(f, f_0)$  为  $f$  和  $f_0$  的互协方差,  $\sigma$  为标准差.

**步骤 8** 如果  $C_o$  值达到预期标准, 则此时恢复的复振幅就是我们所期望的嵌入图像; 如果  $C_o$  值未达到预期标准, 则将此时恢复的复振幅作为初始值, 进行下一轮迭代, 即对所有的  $P_i$  重新进行步骤 2 到步骤 7 的计算. 经多次迭代, 直到重建质量达到预期目标为止. 以上的步骤可由图 2 所示的算法框图直观说明.

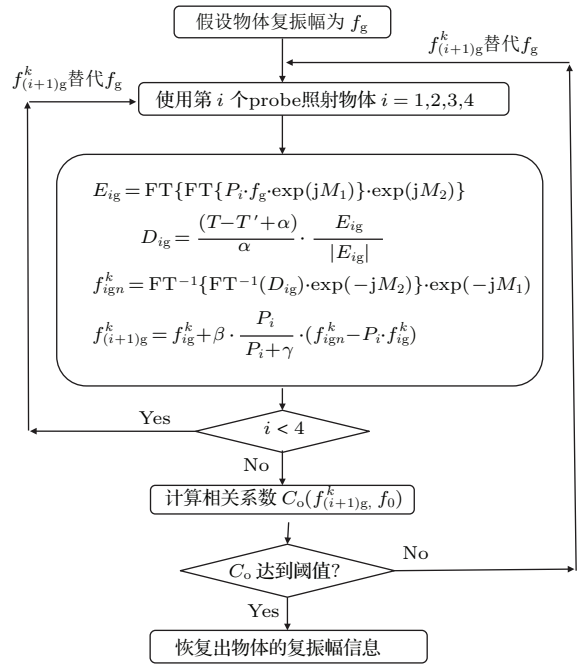


图 2 叠层水印算法框图

Fig. 2. Algorithm flow chart.

### 3 模拟实验与分析

采用 2.1 节所述的照明方式, 如图 1 所示. 选用 "lena" 图和 "ucas" 图分别表示水印的振幅信息和相位信息, "kaola" 图作为宿主图像, 如图 3 所示, 有效采样点数分别为  $256 \times 256$  pixels,  $256 \times 256$  pixels 和  $512 \times 512$  pixels, 图 4 给出 probe1—4 对水印图案的透过图案和伪探针图案.



图3 (a) 水印振幅图像; (b) 相位图像; (c) 宿主图像  
Fig. 3. (a); (b); (c) Respectively denote amplitude image, phase image and host image.

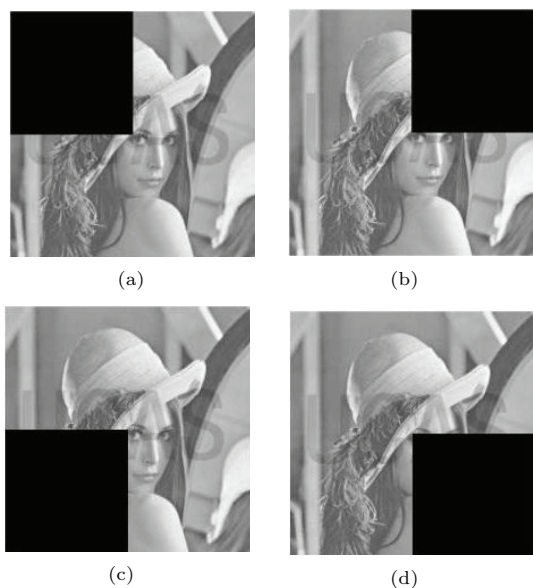


图4 (a)–(d) 分别为 probe1–4 对水印图案的透过图案; (e) 为伪探针图案  
Fig. 4. (a)–(d) Watermark patterns with probe1–4 working; (e) the fake probe pattern.

选取衰减系数  $\alpha = 0.3$  完成加密与嵌入过程可分别记录下如图5所示的5幅图案, 将透过 probe1–4 记录的图像, 经计算机处理成一张图放在振幅位置, 再将透过伪探针得到的图像放在相位位置, 最终得到如图6所示的复振幅传输图像.

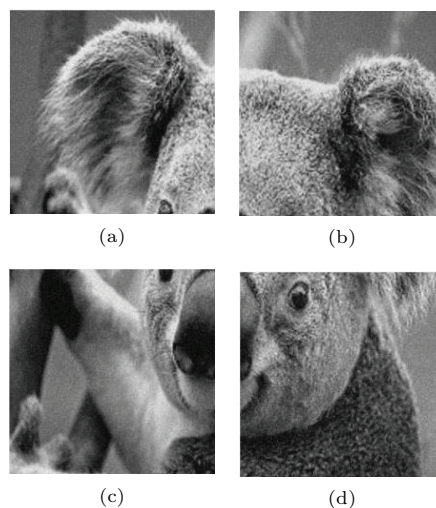


图5 (a)–(d) 表示经过 probe1–4 嵌入在宿主图像的四块; (e) 为伪探针记录下的宿主图像  
Fig. 5. (a)–(d) Watermark image were embedded in the host image through probe1–4; (e) host image recorded by fake probe.



图6 复振幅传输图像  
Fig. 6. Transmitted image.

使用2.2节的提取算法, 由复振幅的传输图像可提取出水印的复振幅信息. 如图7(a), (b) 所示, 分别为水印的振幅提取图像”lena”, 相位提取图像”ucas”; 其中, 图7(c) 给出了, 以迭代次数  $k$  为变量, 以相关系数  $C_0$  为像质评价标准的关系曲线, 结

果表明, 提取的振幅与原来的水印振幅相关系数、提取的相位与原来的水印相位相关系数, 都快速收敛到1. 模拟结果证明了, 叠层水印具有很好的振幅和相位提取能力.

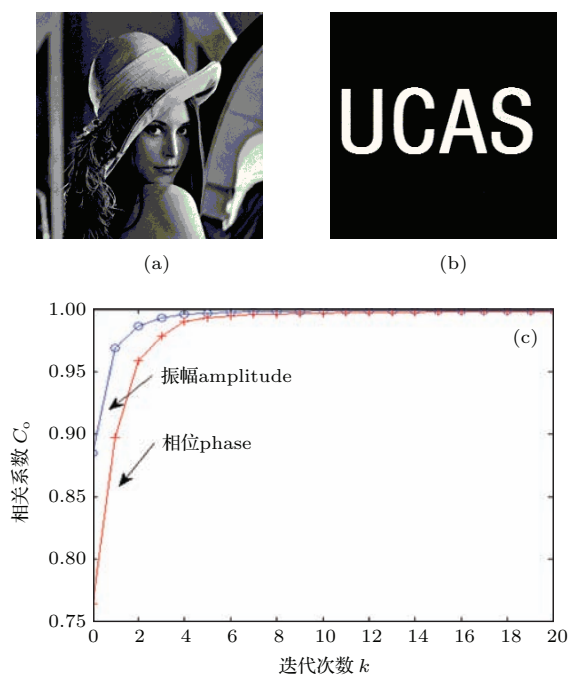


图7 (a) 为恢复的振幅信息; (b) 为恢复的相位信息; (c) 为迭代次数与水印信息重建的关系.

Fig. 7. (a) Recovered amplitude pattern; (b) recovered phase pattern; (c) different number  $k$  of iterations for the coefficient of amplitude pattern and phase pattern.

### 3.1 不可感知性与提取质量

不可感知性包含两个方面的要求: 一方面要求嵌入的水印信息, 用统计的方法是不能恢复的, 或者是不能确定存在的; 另一方面, 要求水印引起的传输图像变化, 对观察者的视觉系统是可见的. 由2.1节可知, 叠层水印嵌入的密文信息为统计独立的随机白噪声, 故从统计的角度, 它是不可感知的. 从视觉角度来讲, 不可感知性与衰减系数 $\alpha$ 有关. 在传统的光学隐藏与水印方法中<sup>[2-4]</sup>, 衰减系数 $\alpha$ 的选取, 与水印提取质量和不可感知性矛盾.

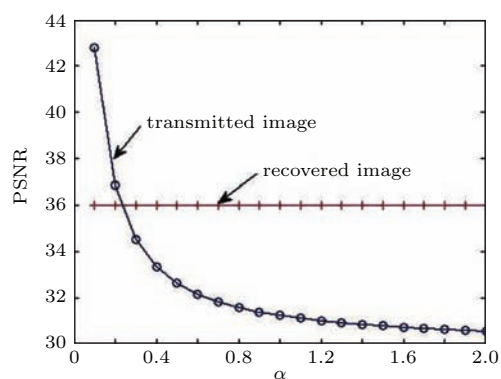


图8 水印恢复质量与传输图像质量随衰减系数的变化曲线

Fig. 8. PSNR for the transmitted image (circles) and for the recovered image (pluses) for different  $\alpha$ .

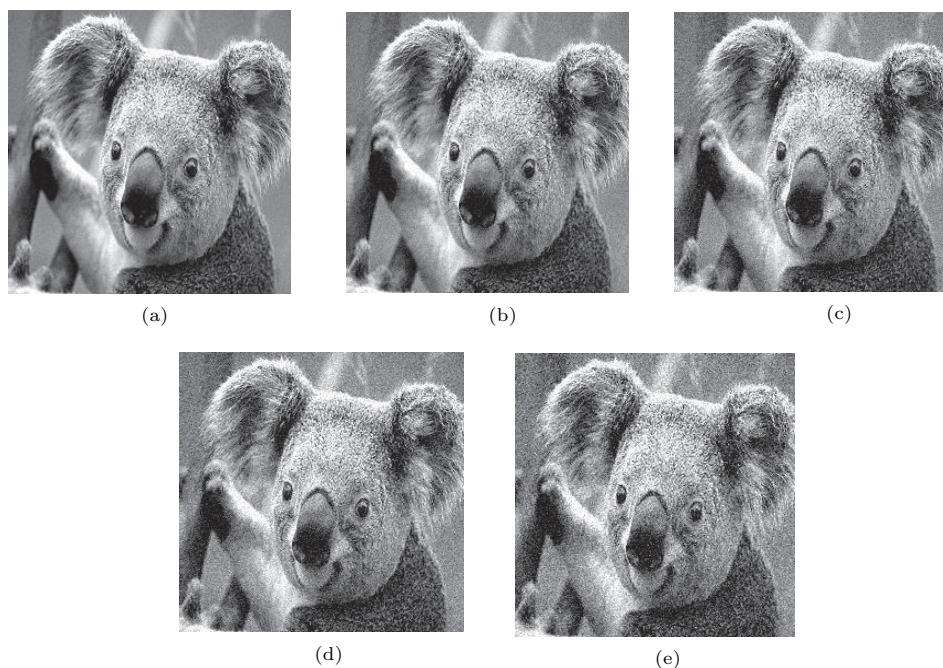


图9 (a)—(e) 分别为衰减系数 $\alpha$ 选取0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5的传输图像

Fig. 9. (a) Transmitted image with  $\alpha = 0.1$ ; (b) transmitted image with  $\alpha = 0.2$ ; (c) transmitted image with  $\alpha = 0.3$ ; (d) transmitted image with  $\alpha = 0.4$ ; (e) transmitted image with  $\alpha = 0.5$ .

衰减系数  $\alpha$  越大, 不可感知性越差, 提取质量越好. 而叠层水印方法, 提取的水印图像质量与衰减系数  $\alpha$  无关. 以  $\alpha$  为自变量, 以峰值信噪比 PSNR 为像质评价标准, 传输图像质量和水印图像质量与  $\alpha$  的关系曲线, 如图 8 所示. 结果表明: 随着  $\alpha$  增大, 传输图像质量下降明显, 水印提取质量不变. 考虑到衰减系数  $\alpha$  的大小也同样影响着水印的鲁棒性, 所以叠层水印在优先满足不可感知性前提下, 选取较大的衰减系数  $\alpha$  值, 以提高鲁棒性. 如图 9 所示, 当衰减系数分别选取 0.1—0.5 时对应的传输图像. 观察可得, 选取衰减系数  $\alpha = 0.3$  是满足对观察者视觉系统的不可感知性. 因此, 本文模拟实验部分均选取  $\alpha = 0.3$ .

### 3.2 鲁棒性的研究

叠层水印具有很好的抗噪声和抗剪切能力, 并且可以通过增加探针的数目和交叠率进一步提高其鲁棒性. 下面将从两方面进行模拟验证. 一方面, 在 3.2.1 和 3.2.2 节中, 采用如图 1 所示的, 照明方式和探针. 以“ucas”图作为水印图像, 对传输图像“kaola”分别添加噪声干扰和剪切处理, 验证叠层水印算法的抗噪声和抗剪切能力; 另一方面, 在 3.2.3 节中, 使用不同的探针数目和交叠率. 以灰度图像“horse”作为水印图像. 对传输图像“kaola”添加更大的噪声干扰, 验证探针对叠层水印鲁棒性的影响.

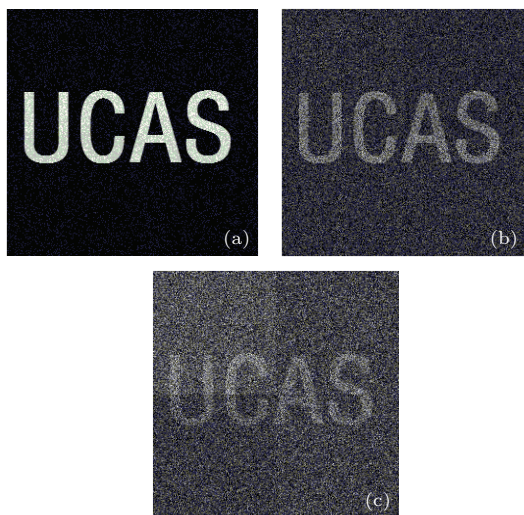


图 10 (a)—(c) 分别为对传输图像分别添加 0.01, 0.05, 0.1 倍的随机噪声恢复的水印图像

Fig. 10. (a) Recovered image from transmitted image with 0.01 times noise; (b) recovered image from transmitted image with 0.05 times noise; (c) recovered image from transmitted image with 0.1 times noise.

#### 3.2.1 传输图像的抗噪声研究

对传输图像, 分别添加取值在  $[0, 0.01]$ ,  $[0, 0.5]$  和  $[0, 0.1]$  的随机噪声, 提取的水印图像, 如图 10 所示, 表 1 中给出相应的相关系数  $C_o$  最大值. 可以看出, 传输图像最大可以抵抗 0.1 倍随机噪声干扰. 验证了, 叠层水印具有很好的抗噪声能力.

表 1 传输图像全局噪声干扰下的  $C_o$  最大值  
Table 1. Maximum value of  $C_o$  for different noise intensity.

添加的随机噪声倍数	0.01	0.05	0.1
相关系数 $C_o$ 最大值	0.99	0.53	0.27

#### 3.2.2 传输图像的抗切割研究

基于密文信息在传输图像的分布情况, 采用两种不同方式对传输图像进行剪切研究. 一种方式为, 从传输图像的中心开始剪切, 分别以 1/16, 1/9, 1/4 比例剪切. 如图 11 (a)—(c) 所示. 提取的水印图像, 如图 11 (d)—(f) 所示. 表 2 中给出相应的相关系数最大值; 另一种方式为, 从传输图像边角开始做剪切, 如图 12 所示.

对比以上两种剪切方式可以发现: 叠成水印算法具有很好的抗剪切能力, 而且, 从边角开始的剪切方式, 可以承受更大的剪切比例, 和更好的水印提取质量. 这是因为: 从中心开始剪切, 嵌入在传输图像的不同层密文信息, 均受到剪切, 产生数据丢失, 公共解减少, 水印提取质量下降严重; 而从边角开始剪切, 只有部分层的数据存在丢失, 使用那些没有被剪切的, 层与层间的公共解, 仍可以提取出完整的水印信息.

表 2 传输图像从中心阻隔干扰下的  $C_o$  最大值  
Table 2. The max value of  $C_o$  for different proportion occlusion.

阻隔比例	1/16	1/9	1/4
相关系数 $C_o$ 最大值	0.89	0.65	0.20

#### 3.2.3 探针数及探针交叠率对鲁棒性的影响

对传输图像添加取值在  $[0, 0.2]$  的归一化随机噪声, 分别从增加探针数量, 和探针交叠率两个方面, 验证叠层水印的鲁棒性加强. 一方面, 保持探针交叠率 [16] 在 50%. 如图 13 所示. 图 14 给出提取的水印图像. 结果表明: 随探针数目增多, 水印提取质量提高, 鲁棒性加强. 另一方面, 使用  $6 \times 6$  个探针. 采用不同的边长使得重叠率分别为 50%, 55%,

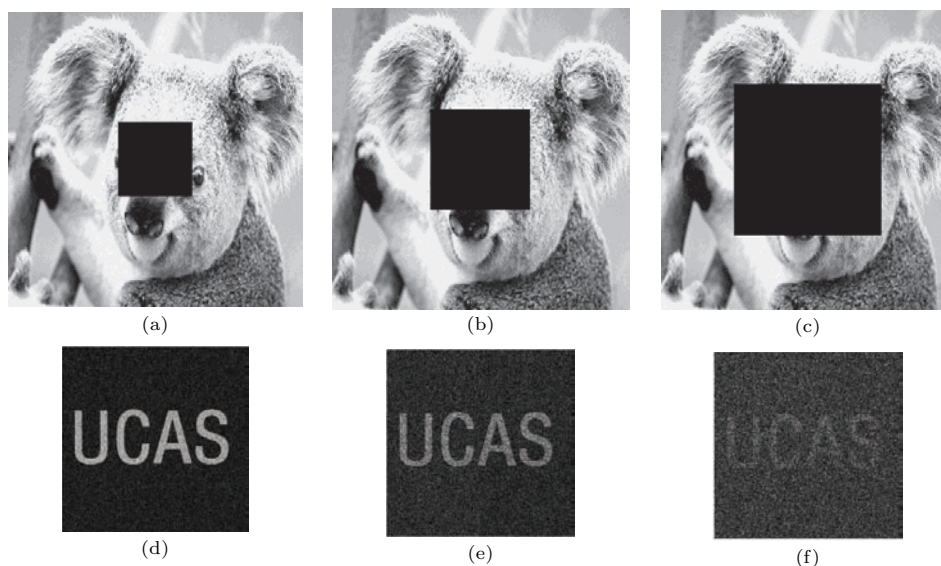


图 11 (a), (b), (c) 分别为传输图像从中心被 1/16, 1/9, 1/4 阻隔; (d), (e), (f) 为对应的恢复水印图像

Fig. 11. Effect of occluding some of the transmitted image pixels from center of transmitted image: (a) 1/16 of the transmitted image pixels are occluded; (d) recovered image with 1/16 occlusion; (b) 1/9 of the transmitted image pixels occluded; (e) recovered image with 1/9 occlusion; (c) 1/4 of the transmitted image pixels occluded; (f) recovered image with 1/4 occlusion.

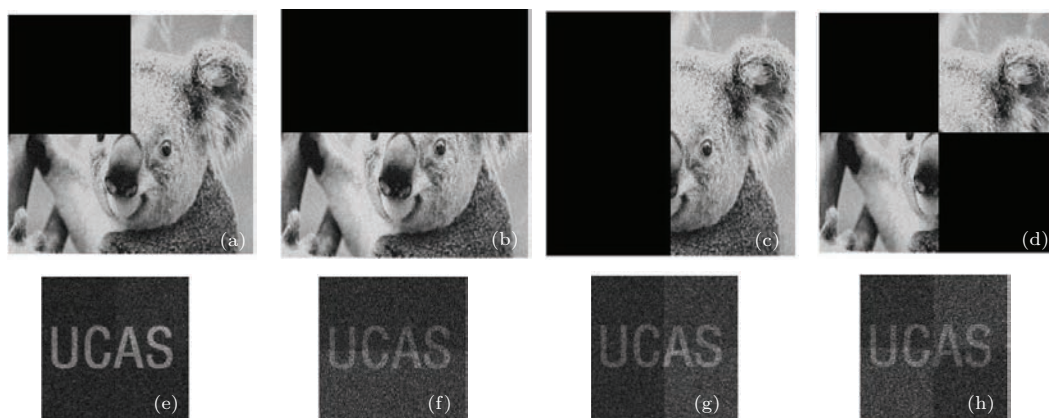


图 12 (a)—(d) 分别为 1 块阻隔, 不同 2 块阻隔的传输图像 (e)—(h) 对应的水印恢复图像

Fig. 12. Effect of occluding some of the transmitted image pixels from corner of transmitted image: (a) 1/4 of the transmitted image pixels are occluded; (e) recovered image with 1/4 occlusion; (b)—(d) 1/2 of the transmitted image pixels occluded; (f)—(h) recovered image with 1/2 occlusion.

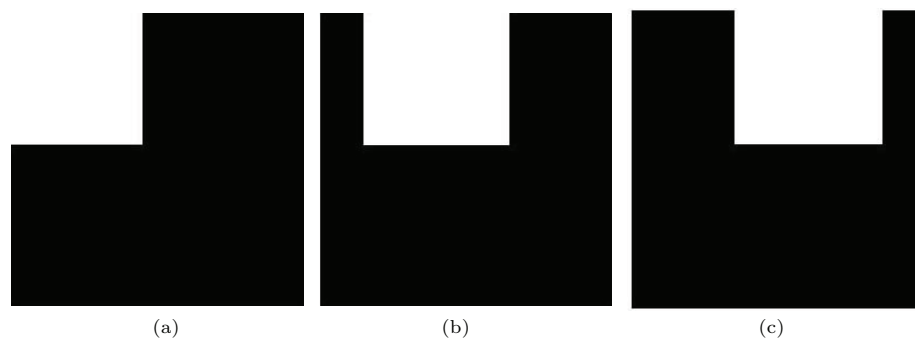


图 13 (a)—(c) 图为共 4 × 4 个探针中前 3 个探针图样

Fig. 13. (a)—(c) Probes pattern.



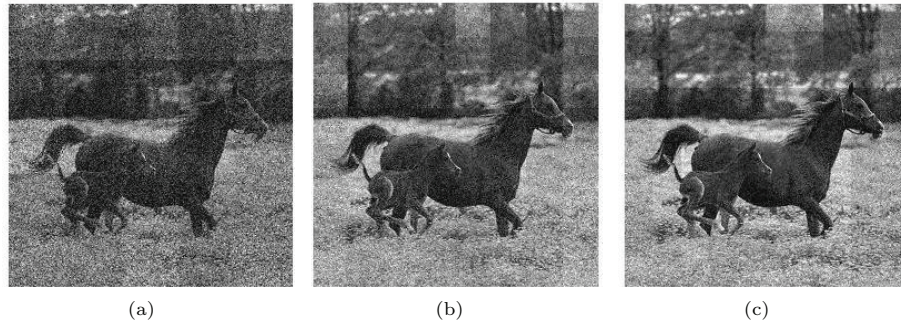


图 14 (a)—(c) 分别表示使用  $4 \times 4$ ,  $7 \times 7$ ,  $9 \times 9$  个探针时重建的水印图像

Fig. 14. (a) Recovered image with  $4 \times 4$  probes; (b) recovered image with  $7 \times 7$  probes; (c) recovered image with  $9 \times 9$  probes.

60%, 65%, 70%. 提取的水印图像与原水印图像的相关系数  $C_0$  如表 3 所示. 可以看到, 提取质量随交叠率的增加而提高, 鲁棒性加强. 从鲁棒性与信息嵌入量的角度分析, 增加探针数目和交叠率都会产生信息嵌入量的增加, 和公共解增加. 则叠层重构出的水印信息越精确, 表现为鲁棒性越强.

表 3 探针交叠率与水印恢复图像的相关系数

Table 3. Maximum value of  $C_0$  for different probes overlap rate.

探针交叠率%	50	55	60	65	70
相关系数 $C_0$ 最大值	0.7793	0.8139	0.8206	0.8225	0.8256

#### 4 叠层水印在 GIF 水印中的应用

叠层水印具有很好的可移植性, 既可以用于一张传输图像, 又可以用于多张传输图像. 以 GIF 图像水印为例, 叠层衍射得到的, 多层密文信息加载在不同的传输图像上. 与使用一张复振幅传输图像不同的是: GIF 图像的水印可以利用人眼的视觉暂留效应, 伪探针记录的图像, 可插入在嵌有密文信息的下一帧, 不需要对传输图像进行相位处理. 如图 15 中, 第一帧为含有密文信息的第一张传输图像, 第二帧为伪探针记录的第一张宿主图像. 提取水印时, 只需使用前帧减去后帧, 获得密文信息, 再结合叠层重构算法, 提取出水印图像, 如图 16 所示.



图 15 上行四张图分别为嵌有密文信息 GIF 的 4 帧图像, 下行分别为伪探针相应记录下的 4 帧图像

Fig. 15. Uplink four GIF image were embedded with information of the cipher texts; downstream, respectively, the fake probe record four images.

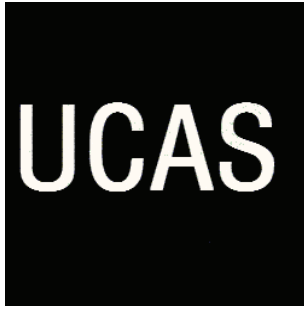


图 16 提取的水印图案

Fig. 16. Recovered image.

## 5 结 论

模拟实验验证了: 首先, 叠层水印具有很好的振幅和相位提取能力. 这为 3D 水印技术提供一种新的思路. 另外, 叠层水印提取的水印质量与衰减系数  $\alpha$  无关, 解决了传统办法中水印不可感知性与提取质量之间的矛盾. 通过对传输图像添加随机噪声干扰, 和剪切处理, 验证了, 叠层水印具有很好的抗噪声和抗剪切能力. 并且发现, 从传输图像边角开始的剪切方式, 可以承受更大的剪切比例. 增加探针数量和交叠率时, 提取的水印质量得到进一步提高, 鲁棒性加强. 最后, 给出叠层水印在 GIF 图像水印的应用举例.

## 参考文献

- [1] Takai N, Mifune Y 2002 *Appl. Opt.* **41** 865
- [2] Kishk S, Javidi B 2002 *Appl. Opt.* **41** 5462
- [3] Kishk S, Javidi B 2003 *Opt. Lett.* **28** 167
- [4] Kishk S, Javidi B 2003 *Opt. Express* **11** 874
- [5] Clemente P, Durán V, Torres-Company V, Tajahuerce E, Lancis J 2010 *Opt. Lett.* **35** 2391
- [6] Chen W, Chen X, Sheppard C J R 2010 *Opt. Lett.* **35** 3817
- [7] Hua L-L, Xu N, Yang G 2014 *Chin. Phys. B* **23** 064201
- [8] Shi Y, Li T, Wang Y, Gao Q, Zhang S, Li H 2013 *Opt. Lett.* **38** 1425
- [9] Refregier P, Javidi B 1995 *Opt. Lett.* **20** 767
- [10] Chang H T, Tsan C L 2005 *Appl. Opt.* **44** 6211
- [11] Situ G, Zhang J 2005 *Opt. Commun.* **245** 55
- [12] He M Z, Cai L Z, Liu Q, Wang X C, Meng X F 2005 *Opt. Commun.* **247** 29
- [13] Kim H, Lee Y H 2005 *Opt. Express* **13** 2881
- [14] Shi Y S, Situ G H, Zhang J J 2007 *Opt. Lett.* **32** 1914
- [15] Shi X Y, Zhao D M 2011 *Appl. Opt.* **50** 766
- [16] Wang Y L, Shi Y S, Li T, Gao Q K, Xiao J, Zhang S G 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 064206 (in Chinese) [王雅丽, 史祎诗, 李拓, 高乾坤, 肖俊, 张三国 2013 物理学报 **62** 064206]
- [17] Gao Q, Wang Y, Li T, Shi Y 2014 *Appl. Opt.* **53** 4700
- [18] Hoppe W 1969 *Acta Cryst. A* **25** 495
- [19] Hoppe W 1982 *Ultramicroscopy*. **10** 187
- [20] Faulkner H M L, Rodenburg J M 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 023903
- [21] Rodenburg J M, Faulkner H M L 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 4795
- [22] Rodenburg J M, Hurst A C, Cullis A G 2007 *Ultramicroscopy*. **107** 227
- [23] Rodenburg J M, Hurst A C, Cullis A G, Dobson B R, Pfeiffer F, Bunk O, David C, Jefimovs K, Johnson I 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 034801
- [24] Thibault P, Dierolf M, Menzel A, Bunk O, David C, Pfeiffer F 2008 *Science* **321** 379
- [25] Maiden A M, Rodenburg J M, Humphry M J 2010 *Opt. Lett.* **35** 2585

# Watermarking algorithm based on ptychographical imaging<sup>\*</sup>

Liu Xiang-Lei<sup>1)2)</sup> Pan Ze<sup>1)2)</sup> Wang Ya-Li<sup>1)</sup> Shi Yi-Shi<sup>1)2)3)†</sup>

1) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

2) (*Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*)

3) (*State Key Laboratory of Information Security, Institute of Information Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China*)

( Received 17 June 2015; revised manuscript received 3 August 2015 )

## Abstract

We propose a method for watermarking algorithm using ptychographical imaging. The proposed method uses four probes and one fake probe for illumination, orderly. And five weighted double phase-encoded hidden images are added to a host image that is referred to as the transmitted image. Specifically, the amplitude of the transmitted image contains encoded and attenuated watermark image. And the phase of the transmitted image is the host image due to the application of the fake probe. We develop an analytical presentation for the experimental principle using mathematical derivation of the fake probe and ptychographical imaging. We test analytically the distortion of the transmitted image that is due to noise jamming and the effect of the occlusion of the pixels of the transmitted image. Moreover, we discuss the impact of the probe number and probe overlap rate on system robustness, respectively. Results of computer simulations are presented. First, the amplitude and phase of the watermark image are extracted well. Second, the contradiction between watermark imperceptible and watermark extraction quality can be resolved. Third, the simulations illustrate the system ability to extract the watermark image under distortions and the robustness of the transmitted image against removal trials. Furthermore, the robustness of the system is improved, as the number or overlap rate of the probe increases. In the end, the proposed method is applied to GIF images.

**Keywords:** ptychographical imaging, double random coding, optical watermark, robust

**PACS:** 42.30.-d, 42.30.Rx, 42.25.Fx

**DOI:** [10.7498/aps.64.234201](https://doi.org/10.7498/aps.64.234201)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grand Nos. 61575197, 61307018), the National Natural Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (Grant No. 61225024), the Starting Foundation for Excellent Doctoral Dissertation of Chinese Academy of Sciences, the President Foundation of University of Chinese Academy of Sciences, the Fusion Foundation of Research and Education of Chinese Academy of Sciences, China, the K. C. Wong Education Foundation, China.

† Corresponding author. E-mail: [sysopt@126.com](mailto:sysopt@126.com)