

基于相位恢复的傅里叶变换全息图像数字水印

陈大庆^{1,2} 顾济华^{1,2} 周 皓^{1,2} 姜锦虎¹

(¹ 苏州大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215006; ² 江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006)

摘要 提出了一种新的基于信息光学的图像数字水印方法。该方法采用相位恢复算法将需要隐藏的水印图像编码为纯相位, 然后用该纯相位代替传统傅里叶变换全息中的物光波频谱与参考光波发生干涉, 得到理论对比度为 100% 的傅里叶变换全息图。采用密钥将此全息图进行加密, 并通过离散余弦变换在频域嵌入宿主图像中完成水印信息的嵌入。水印提取时先用密钥将提取的全息图进行解密, 再进行光学或数字全息再现即可完成。理论分析和数值计算实验表明, 该水印技术对有损压缩、剪切和滤波等多种图像处理操作均具有很高的稳健性, 比传统傅里叶变换全息水印的稳健性有很大提高, 具有很好的实用价值。

关键词 信息光学; 信息隐藏; 数字水印; 相位恢复算法; 数字全息

中图分类号 O438 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092912.3310

An Image Digital Watermarking with Phase Retrieval Algorithm and Fourier Transformation Hologram

Chen Daqing^{1,2} Gu Jihua^{1,2} Zhou Hao^{1,2} Jiang Jinhu¹

(¹ School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)
(² Key Lab of Modern Optical Engineering of Jiangsu Province, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract A new approach of digital watermarking based on information optics is proposed. The watermarking image is transformed into virtual object wave after phase retrieval algorithm. Then use the virtual object wave to take the place of traditional Fourier-transformed object wave. It interfered with the reference wave to form Fourier-transformed digital hologram and the contrast is 100% in theory. Hologram is embedded into host image by discrete-cosine-transform and encrypted by security key. It can be extracted with the security key. The watermark is retrieved by reconstruction of optical or digital holography. Theoretical analysis and numerical experiments show that the algorithm has more robustness and practical value to image lossy compression, cropping and filter, comparing with the algorithm based on general digital holography.

Key words information optics; information hiding; digital watermarking; phase retrieval algorithm; digital holography

1 引 言

数字水印技术作为数字媒体版权的强有力保护手段, 已成为目前信息安全领域研究的热点。在完成数据加密或信息隐藏的过程中, 由于基于光学理论与方法的数字水印可以通过计算光的干涉、衍射、全息等过程, 具有多维、大容量、高设计自由度、高稳健性等优势, 因此有不少利用光学方法来实现图像

的数字水印和信息隐藏的研究^[1~14]。Nobukatsu Takai 等^[4]将光全息概念应用到数字水印算法中, 提出了数字全息水印, 在目标物(水印)上调制了随机相位分布, 然后将水印的傅里叶变换分布插入到宿主图像中。结果表明, 全息水印有一定的稳健性和抗攻击性, 尤其具有抗剪切的特点。在文献^[1,5]的基础上提出了一种新的基于相位恢复和数字全息

收稿日期: 2009-01-09; 收到修改稿日期: 2009-02-23

作者简介: 陈大庆(1971—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事信息光学和数字水印等方面研究。

E-mail: chendq@suda.edu.cn

导师简介: 顾济华(1957—), 男, 博士, 教授, 主要从事信息光学方面的研究。E-mail: jhgu@suda.edu.cn(通信联系人)

技术的图像水印方法,水印图像经相位恢复处理形成纯相位的虚拟波前,该物光波与参考光波发生干涉,形成傅里叶变换全息图。在频域插入宿主图像中,解码后得到了高质量的水印结果。理论分析和仿真实验证明了改进后的方法具有更好的稳健性。

2 傅里叶变换数字全息

Nobukatsu Takai 等将光学全息技术应用到数字水印中,采用的光学处理方法是传统的傅里叶数字全息术,其原理如下。

2.1 傅里叶变换数字全息图的记录

傅里叶变换全息图记录的是物体的傅里叶频谱分布。如图 1 所示,其中物函数 $g(x_0, y_0)$ 先用随机相位 $\exp[j\theta(x_0, y_0)]$ 调制,然后用单色平行光照明,

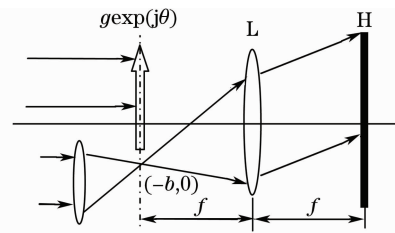


图 1 傅里叶变换数字全息图的记录

Fig. 1 Recording of Fourier transform digital hologram in the back focal plane of the lens

$$G_{(x,y)} = \mathcal{F}\{g(x_0, y_0) \exp[j\theta(x_0, y_0)]\}, \quad (1)$$

(1)式中的 \mathcal{F} 表示傅里叶变换。图 1 中平行参考光表达式为

$$R(x, y) = R_0 \exp\left(j2\pi b \frac{x}{\lambda f}\right), \quad (2)$$

两束光在底片上干涉,形成光强分布为

$$H(x, y) = |G(x, y)|^2 + R_0^2 + R_0 \exp\left(-j2\pi b \frac{x}{\lambda f}\right) \mathcal{F}\{g(x_0, y_0) \exp[j\theta(x_0, y_0)]\} + R_0 \exp\left(j2\pi b \frac{x}{\lambda f}\right) \mathcal{F}^*\{g(x_0, y_0) \exp[j\theta(x_0, y_0)]\}. \quad (3)$$

(3)式中第一和第二项对应全息图的晕轮光和中心亮点,数字全息处理时光强只取后两项得

$$H(x, y) = \exp\left(-j2\pi b \frac{x}{\lambda f}\right) \mathcal{F}\{g(x_0, y_0) \exp[j\theta(x_0, y_0)]\} + \exp\left(j2\pi b \frac{x}{\lambda f}\right) \mathcal{F}^*\{g(x_0, y_0) \exp[j\theta(x_0, y_0)]\}, \quad (4)$$

(4)式就是记录到的传统傅里叶变换数字全息图。

2.2 傅里叶变换数字全息图的再现

傅里叶变换数字全息图的再现光路如图 2 所示,用平行光垂直照射全息图,在后焦面上得到其频谱函数,选取适当的 b 使得原始像和共轭像分离^[15],再现像为

$$I = \lambda^4 f^4 |g(-\xi - b, -\eta)|^2 + \lambda^4 f^4 |g(\xi - b, \eta)|^2, \quad (5)$$

(5)式表明,使用傅里叶数字全息时,再现后的信息是原始像和共轭像同时出现在像平面上。

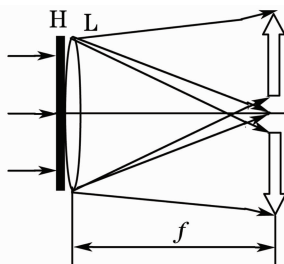


图 2 傅里叶变换数字全息图的再现

Fig. 2 Reconstruction of Fourier transform digital hologram

3 基于相位恢复算法的傅里叶变换全息水印处理

水印嵌入过程分 3 个步骤,如图 3 所示,首先采用相位恢复算法将水印编码成纯相位函数^[1];然后把纯相位函数作为虚拟波前跟平行参考光干涉,在计算机中生成傅里叶变换数字全息图;最后采用密钥将此全息图进行加密,并通过离散余弦变换(DCT)在频域嵌入宿主图像中完成水印的嵌入。

3.1 水印的相位恢复算法

相位恢复计算原理如图 4 所示,其中 $G(x, y)$ 表示与输入复振幅分布 $f(x_0, y_0)$ 对应的频谱。首先对 $g(x_0, y_0)$ 乘以一个初始相位作为问题的第一个试探解,对复振幅 $f(x_0, y_0)$ 进行傅里叶变换得到频谱 $G'(x, y)$,引入频域限制条件后做逆傅里叶变换得到 $f'(x_0, y_0)$,运用空域约束条件形成新的 $f(x_0, y_0)$ 进入下次循环。重复上述过程一直到 $f(x_0, y_0)$ 与期望值的差异小于某一特定值为止,迭代结束后得到的最佳相位分布为 $G(x, y)$ 。上述相位恢复计算可表示为

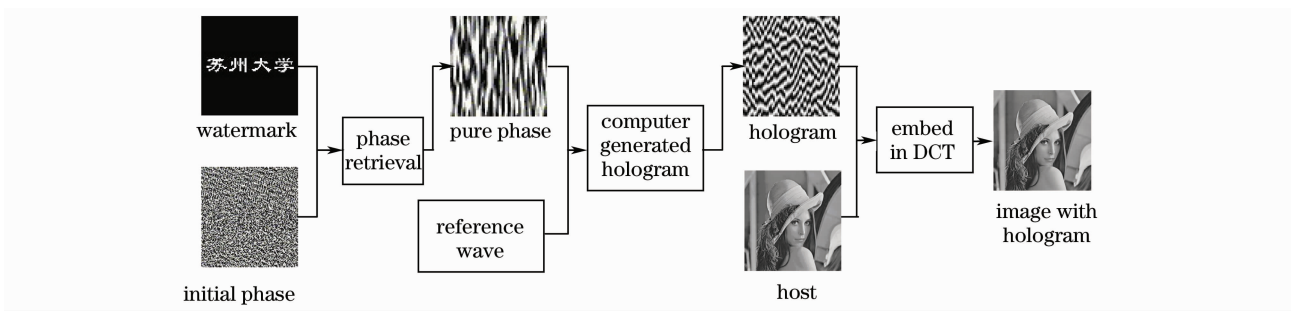


图 3 相位恢复的数字全息水印嵌入原理图

Fig. 3 Scheme of Fourier transform digital hologram watermark based on phase retrieval

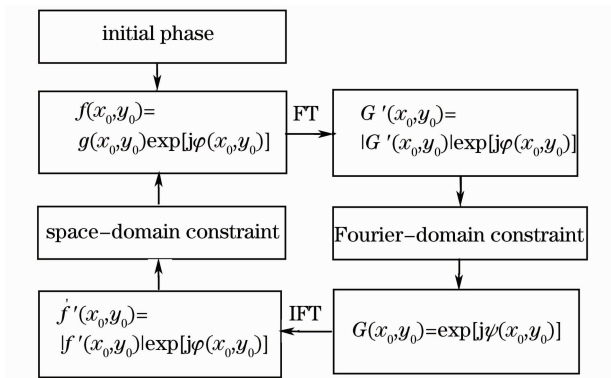


图 4 图像的相位恢复原理图

Fig. 4 Schematic illustration of image phase retrieval

$$\mathcal{F}\{g(x_0, y_0) \exp[i\varphi(x_0, y_0)]\} =$$

$$G(x, y) = \exp[j\psi(x, y)], \quad (6)$$

(6)式表示物函数 $g(x_0, y_0)$ 被特殊的相位分布 $\exp[i\varphi(x_0, y_0)]$ 调制后,其傅里叶频谱是纯相位函数。

3.2 相位恢复算法的傅里叶变换数字全息方法

比较(1)式和(6)式,两者分别表示物函数被不同的相位 $\exp[j\theta(x_0, y_0)]$ 和 $\exp[j\varphi(x_0, y_0)]$ 调制后的傅里叶频谱分布,因此可以用相位编码 $G(x, y) = \exp[j\psi(x, y)]$ 取代(1)式,即由(6)式和(2)式干涉得到相位恢复算法的傅里叶变换数字全息图。其全息面上的强度分布可表示为

$$H(x, y) = |G(x, y) + R(x, y)|^2 = |\exp[j\psi(x, y)]|^2 + R_0^2 + \exp^* [j\psi(x, y)] R_0 \exp\left(j2\pi b \frac{x}{\lambda f}\right) + \exp[j\psi(x, y)] R_0 \exp\left(-j2\pi b \frac{x}{\lambda f}\right), \quad (7)$$

(7)式中第一,二项对应相位恢复算法的傅里叶变换全息图的晕轮光和中心亮点,数字全息处理时予以去除得

$$H(x, y) = \exp^* [j\psi(x, y)] \exp\left(j2\pi b \frac{x}{\lambda f}\right) + \exp[j\psi(x, y)] \exp\left(-j2\pi b \frac{x}{\lambda f}\right), \quad (8)$$

(8)式就是通过相位恢复和全息技术将水印信号转化成的傅里叶变换数字全息图。

该全息图的再现光路跟传统傅里叶变换全息再现光路相同,如图 2 所示。用平行光垂直照射全息图,在后焦面上得到其频谱函数,频谱的强度为

$$I = \left| \mathcal{F} \left\{ \exp\left(-j2\pi b \frac{x}{\lambda f}\right) \exp(j\psi) + \exp\left(j2\pi b \frac{x}{\lambda f}\right) \exp(-j\psi) \right\} \right|^2 = \lambda^4 f^4 |g(-\xi - b, -\eta)|^2 + \lambda^4 f^4 |g(\xi - b, \eta)|^2 + \lambda^4 f^4 g(\xi - b, \eta) g(-\xi - b, -\eta) \{ \exp[j\varphi(-\xi - b, -\eta) + j\varphi(\xi - b, \eta)] + \exp[-j\varphi(-\xi - b, -\eta) - j\varphi(\xi - b, \eta)] \}, \quad (9)$$

选取适当的 b 使得原始像和共轭像分离得

$$I = \lambda^4 f^4 |g(-\xi - b, -\eta)|^2 + \lambda^4 f^4 |g(\xi - b, \eta)|^2, \quad (10)$$

(10)式表明,基于相位恢复的傅里叶数字全息,再现后的信息是原始像和共轭像同时再现在像平面上。比较(10)式和(5)式,两者形式完全一样,说明两种

数字全息方法在没有受到攻击时都能实现全息记录和再现。

根据信息光学理论,干涉图的对比度表达式为

$$V = 2 \sqrt{I_R I_O} / (I_R + I_O), \quad (11)$$

其中 I_O 和 I_R 分别为物光波和参考光的光强。

设参考光为单位振幅平行光,则 I_R 为 1。(7) 式

中物光波为纯相位,则物光强 $I_0 = 1$,所以相位恢复算法的全息图理论对比度为 100%。而传统傅里叶全息图的物光波是被随机相位调制后的频谱,其全息图对比度远低于相位恢复算法。

采用相同的物函数和参考光,传统的傅里叶数字全息图和相位恢复算法得到的数字全息图如图 5 所示,对应三维效果如图 6 所示,从图中可见相位恢复算法的全息图具有较高的对比度。当受到攻击后,对比度高的全息图能更好的再现物函数,所以相位恢复算法能更好地提取物函数信息,为下一步图像数字水印的稳健性提供了基础。

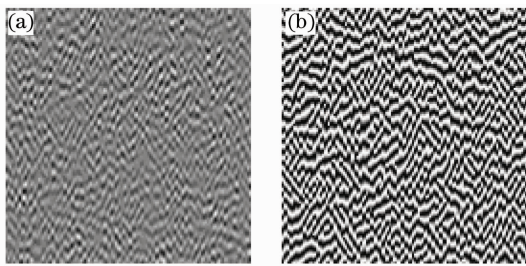


图 5 传统方法(a)和相位恢复算法(b)的数字全息图
Fig. 5 Digital hologram with traditional method (a) and phase retrieval algorithm (b)

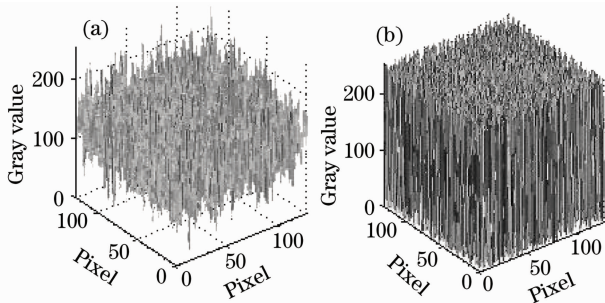


图 6 传统方法(a)和相位恢复算法(b)全息图的三维比较

Fig. 6 3-D image of digital hologram with traditional method (a) and phase retrieval algorithm (b)

3.3 数字水印的嵌入

将水印信号转变为数字全息图后,为了提高水印的抗压缩能力,采用离散余弦变换^[5]的方法嵌入数字全息水印。将原始图像分成 8×8 的小块并做离散余弦变换,在每一小块的中频部分嵌入全息图的像素值。由于 JPEG 压缩主要破坏图像的高频信息,所以将水印信号加到 DCT 频域中频成分上。为提高数字水印的安全性和消除水印中相连元素的相关性,采用伪随机序列对水印在嵌入之前进行伪随机排序。

3.4 数字水印的提取

水印提取时先使用离散余弦变换提取全息图,

再用密钥将提取的全息图进行解密,最后进行光学或数字傅里叶变换即可完成水印的提取。根据相位恢复算法的傅里叶变换全息理论,再现后的信息是原始像和共轭像同时出现在像平面上。

4 仿真实验

为了证明相位恢复的傅里叶数字全息方法的可行性和稳健性,进行了仿真实验,并进一步跟传统的傅里叶数字全息水印进行对比实验。

4.1 相位恢复算法的傅里叶数字全息实验

首先选取 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 图像作为原始信息,如图 7 所示。图 8 为通过相位恢复计算得到纯相位函数。把图 8 跟平行参考光干涉,所得数字全息图为图 5(b)。图 9 是数字全息图的再现结果,由原始像和共轭像共同组成。该实验证实了相位恢复的傅里叶数字全息方法能实现全息图的记录和再现。



图 7 原始信息

Fig. 7 Original information

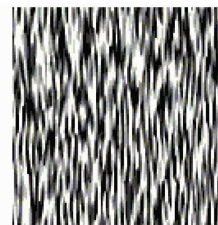


图 8 相位恢复的纯位相

Fig. 8 Pure phase by phase retrieval



图 9 再现的图像

Fig. 9 Reconstructed image

4.2 全息水印嵌入和提取过程的验证

选取 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 灰度图作为宿主信息,如图 10(a)所示。图 10(d)为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 的全息水印,进行伪随机排列后在 DCT 域

嵌入宿主图像中频区域,得到图 10(b)。把图 10(b)进行 JPEG 压缩攻击,压缩质量为 90,得到图 10(c)。图 10(e)为提取出的全息图,进行全息再现得到原始信息,如图 10(f)所示。图 10(f)表明,在受到 JPEG 压缩攻击的情况下,仍可以得到清晰的原始信息,相位恢复的数字水印技术是可行的。

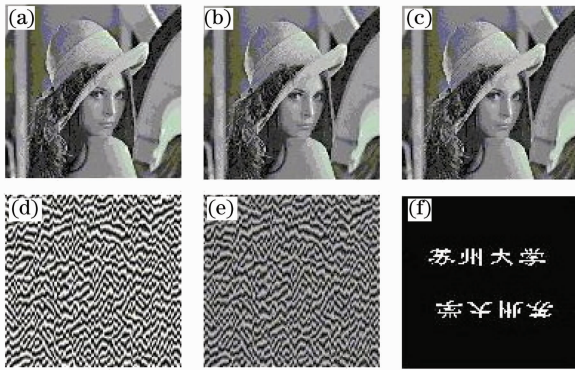


图 10 数字全息水印嵌入和提取仿真结果
Fig. 10 Simulation results of digital hologram watermark embedded and extracted

4.3 跟传统傅里叶全息水印进行对比实验

为了验证相位恢复的傅里叶数字全息方法的稳

健性,在相同嵌入强度的情况下,跟传统傅里叶全息数字水印进行对比实验。在实验过程中为了消除观察者经验、环境条件等因素的影响,采用峰值信噪比 (PSNR)对原始水印和提取的数字全息图水印的相似性做客观评价,峰值信噪比的定义为

$$R_{\text{PSN}} = 10 \times \lg \frac{(M_1 \times M_2) \times [\text{Max} \forall_{i,j} w(i,j)]^2}{\sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} [w(i,j) - w_s(i,j)]^2}, \quad (12)$$

JPEG 压缩实验如图 11 所示,图 11(a)~图 11(e)是压缩质量分别为 90,80,70,60,50 时,传统数字全息水印法的结果,图 11(f)~图 11(j)是压缩质量分别为 90,80,70,60,50 时相位恢复的傅里叶数字全息方法的结果。同时表 1 和表 2 给出两种全息方法的含水印图像峰值信噪比和提取水印的峰值信噪比。实验表明在相同嵌入条件时,两种方法含水印图像的峰值信噪比相近,说明压缩攻击对两种方法的含水印图像影响相近。相位恢复的傅里叶数字全息方法从受攻击图像中提取出的水印峰值信噪比远高于普通全息方法,随着压缩强度的增加,相位恢复的傅里叶数字全息方法的优越性越来越明显。

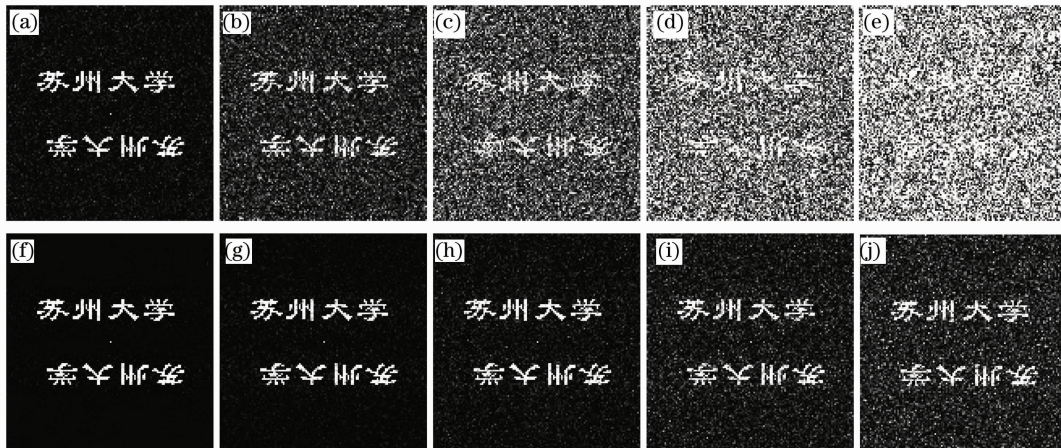


图 11 JPEG 压缩对比实验

Fig. 11 Comparison by JPEG compression

表 1 传统数字全息水印法经 JPEG 压缩后的峰值信噪比

Table 1 Peak signal to noise ratio after JPEG compression by tradition digital hologram watermark method

JPEG compression quality	90	80	70	60	50
PSNR of the image with watermark / dB	39.77	37.76	36.66	35.85	35.23
PSNR of the retrieved digital hologram watermark / dB	24.14	13.36	7.90	4.68	3.07

表 2 相位恢复算法经 JPEG 压缩后的峰值信噪比

Table 2 Peak signal to noise ratio after JPEG compression by phase retrieval algorithm

JPEG compression quality	90	80	70	60	50
PSNR of the image with watermark / dB	39.56	37.64	36.56	35.77	35.15
PSNR of the retrieved digital hologram watermark / dB	36.16	27.97	22.48	17.32	13.95

剪切比较实验。抗剪切是数字全息的优点,把嵌入水印的图像分别切去原图像的 10%~50%,然后从中提取信息,结果如图 12 所示。图 12(a)~图 12(e)是对宿主图像剪切攻击,分别截去 10%,

20%,30%,40%,50%;图 12(f)~图 12(j)是用传统数字全息水印法再现的结果;图 12(k)~图 12(o)是用相位恢复数字全息方法再现的结果。

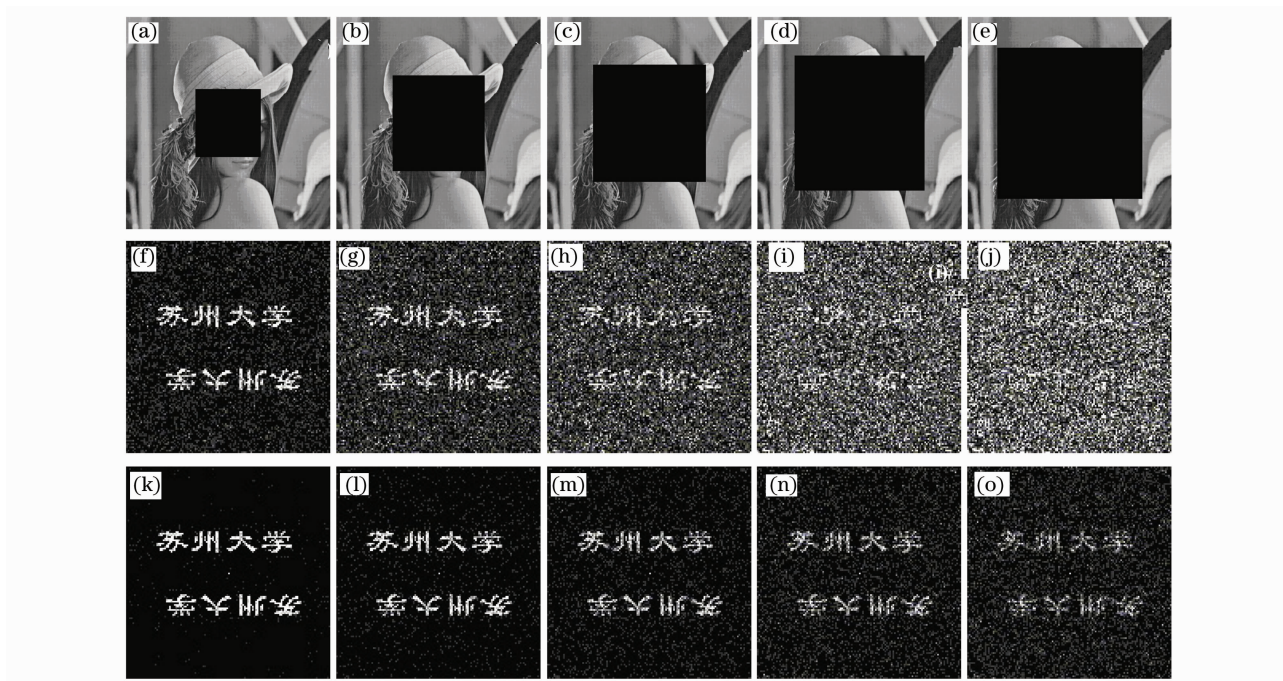


图 12 剪切对比实验

Fig. 12 Comparison by clipping

滤波实验。对嵌入水印的图像作 3×3 的均值滤波和 3×3 的高斯低通滤波,其中 $\sigma=0.6$ 。提取结果如图 13 所示。图 13(a)和 13 图(b)是用传统

数字全息水印法进行再现的结果,图 13(c)和图 13(d)是用相位恢复的数字全息方法再现的结果。

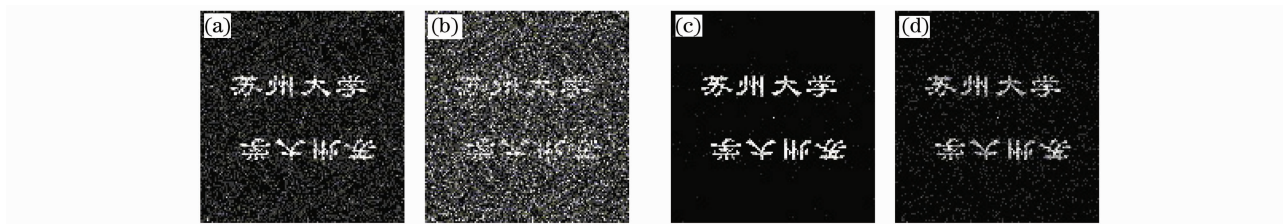


图 13 高斯低通滤波(a),(c)和均值滤波(b),(d)对比实验

Fig. 13 Comparison by Gaussian lowpass filter (a),(c) and average filter (b),(d)

对比实验结果都显示,基于相位恢复的数字全息水印具有很好的稳健性,比传统的傅里叶数字全息水印稳健性有了很大提高。

全息图。通过离散余弦变换把该全息图在频域嵌入宿主图像中,并且采用密钥加强了水印的安全性。理论分析和仿真实验证实了改进后的方法具有很好的稳健性。

5 结 论

提出了一种新的基于相位恢复和数字全息技术的图像数字水印算法,改进了传统的数字全息图像水印技术。该方法采用相位恢复算法将需要隐藏的水印图像编码为纯相位,来代替传统的傅里叶变换全息中的物光波频谱,得到高对比度的傅里叶变换

参 考 文 献

- 1 R. K. Wang, I. A. Watson, C. Chatwin. Random phase encoding for optical security [J]. *Optical Engineering*, 1996, **35**(9): 2464~2469
- 2 Situ Guohai, Zhang Jingjuan. Image hiding with computer-generated phase codes for optical authentication [J]. *Optics Communications*, 2005, **245**(1-6): 55~65

- 3 H. T. Chang, C. L. Tsan. Image watermarking by use of digital holography embedded in the discrete-cosine-transform domain [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(29): 6211~6219
- 4 Nobukatsu Takai, Yuto Mifune. Digital watermarking by a holographic technique [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(5): 865~873
- 5 Yuchi Liang, Gu Jihua, Liu Wei *et al.*. An image digital watermark technique based on digital holography and discrete cosine transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 355~361
尉迟亮, 顾济华, 刘 薇等. 基于数字全息及离散余弦变换的图像数字水印技术[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 355~361
- 6 Peng Xiang, Zhang Peng, Niu Hanben. 3-D spatial digital watermarking system based on virtual optics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1507~1510
彭 翔, 张 鹏, 牛憨笨. 基于虚拟光学的三维空间数字水印系统[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11): 1507~1510
- 7 Peng Xiang, Bai Weidong, Tian Jindong. Digital watermarking with half-tone encoded computer generated hologram[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1011~1017
彭 翔, 白伟东, 田劲东. 半色调编码计算全息图的数字水印方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1011~1017
- 8 Sun Liujie, Zhuang Songlin. Anti-fake technique by double random phase encrypted holographic mark [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 31~34
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): 31~34
- 9 Huang Qinglong, Liu Jianlan. Blind digital watermarking technique based on optical fresnel diffraction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1145~1149
黄清龙, 刘建岚. 基于光学菲涅耳衍射的“盲数字水印”技术[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1145~1149
- 10 Chen Linsen, Zhou Xiaohong, Shao Jie. A digital hologram watermarking with large information contents based on binary phase encryption method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 616~620
陈林森, 周小红, 邵 洁. 一种基于二元相位加密的大信息量数字全息水印[J]. *光子学报*, 2005, **34**(4): 616~620
- 11 Yang Xiaoping, Zhai Hongchen, Wang Mingwei. Gray-image information hiding based on kinoform[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(2): 847~852
杨晓苹, 翟宏琛, 王明伟. 一种应用相息图对灰度图像信息进行隐藏的方法[J]. *物理学报*, 2008, **57**(2): 847~852
- 12 Liu Fumin, Zhai Hongchen, Yang Xiaoping. Kinoform-based iterative random phase encryption [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(10): 2462~2465
刘福民, 翟宏琛, 杨晓苹. 基于相息图迭代的随机相位加密[J]. *物理学报*, 2003, **52**(10): 2462~2465
- 13 Wang Yongying, Wang Yurong, Yang Yongbin. Optical hierarchical image encryption by use of iterative fourier transform algorithm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1360~1364
王永瑛, 王玉荣, 杨永斌. 用迭代傅里叶变换算法实现光学分级图像加密[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1360~1364
- 14 Sun Liujie, Zhuang Songlin. Digital watermarking of encrypted in-line holography[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(1): 131~137
孙刘杰, 庄松林. 加密同轴全息数字水印[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(1): 131~137
- 15 Liu Cheng, Liu Zhigang, Bo Feng *et al.*. Separation of the reconstructed images in digital holography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 588~591
刘 诚, 刘志刚, 薄 峰等. 数字全息中再现像分离问题的研究 [J]. *光子学报*, 2003, **32**(5): 588~591