

文章编号: 0253-2239(2006)03-0355-7

基于数字全息及离散余弦变换的图像数字水印技术

尉迟亮^{1,2} 顾济华^{1,2*} 刘 薇^{1,2} 陶 智^{1,2}

(¹ 苏州大学物理系, 苏州 215006
² 苏州大学江苏省现代光学技术重点实验室, 苏州 215006)

摘要: 提出了一种以数字全息和离散余弦变换为基础的数字水印技术, 实现了在原始图像中嵌入数字全息水印。考虑到数字全息图的不可摧毁性, 使得数字全息水印本身就具有良好的抗剪切能力, 并且与传统的二维灰度水印相比嵌入的信息更多。数字全息图通过傅里叶变换全息的方法获得, 为了提高抗有损压缩能力, 在数字全息水印嵌入过程中采用了基于(JPEG 模型和分解离散余弦变换(DCT)系数的方法。实验表明, 通过该算法获得的数字全息水印对 JPEG 有损压缩和剪切等图像处理操作均有很好的稳健性, 并且采用密钥加强了水印的安全性。因此该算法能成为数字多媒体产品版权保护的有效方案。

关键词: 信息光学; 数字水印; 数字全息; 离散余弦变换; 傅里叶变换; JPEG 模型

中图分类号: O438.1 文献标识码: A

An Image Digital Watermark Technique Based on Digital Holography and Discrete Cosine Transform

Yuchi Liang^{1,2} Gu Jihua^{1,2} Liu Wei^{1,2} Tao Zhi^{1,2}

(¹ Physics Department, Soochow University, Suzhou 215006
² Key Laboratory of Modern Optical Engineering of Jiangsu Province, Soochow University, Suzhou 215006)

Abstract: A new digital watermark technique based on digital holography and discrete cosine transform (DCT) is presented. The digital holographic watermark is embedded into an original image. Because the hologram can't be destroyed, the digital hologram watermark is constitutionally robust to cropping. It can embed more information than traditional methods. The digital hologram is obtained by the means of Fourier transform holography. In order to enhance its robustness to lossy compression, the watermark is embedded by using JPEG model and decomposing DCT coefficients. The experimental results indicate that the proposed algorithm is robust to many image operations, such as JPEG lossy compression and image cropping. And the application of security lock provides a good security. So this algorithm can be used to protect the digital multi-media's copyright efficiently.

Key words: information optics; digital watermark; digital holography; discrete cosine transform; Fourier transform; JPEG model

1 引 言

保护数字产品的知识产权和阻止盗版已经成为数字产品和网络应用面临的严峻问题。对数字图像、音频、视频等多媒体产品进行水印处理通常用来解决产品所有权问题以及对产品内容的原始性进行校验, 数字多媒体产品的水印处理技术已经成为近年来研究的热点领域之一^[1]。

在数字水印现有的研究成果中, 被嵌入的水印

图像多是二值或是灰度平面图像, 信息量有限, 并且盗版者已成功研究了一系列的水印攻击方法。鉴于以上几点, 有学者提出了与现代光学技术相结合的水印新算法, 如虚拟光学法^[2,3], 数字全息法^[4]。其中由日本学者 Nobukatsu Takai 和 Yuto Mifune 于 2002 年提出的最初的数字全息法, 成功地将二维水印信号以全息图的形式嵌入到原始图像中, 并且由于数字全息具有不可摧毁性, 使得该方法本身就具

作者简介: 尉迟亮(1980~), 男, 江苏苏州人, 苏州大学物理系硕士研究生, 主要从事数字全息、数字水印等方面的研究。
E-mail: 210323001@suda.edu.cn, aleux_yuchi@163.com

* 通信联系人。E-mail: jhgu@suda.edu.cn

收稿日期: 2005-05-31; 收到修改稿日期: 2005-08-15

有良好的抗剪切能力。但由于他们采用的是在空间域直接相加嵌入全息图水印信号,因此该方法的抗压缩能力很差,而且在加入水印时需要先将原始图像进行低通滤波,对原始图像本身就是一种破坏。为了克服这些缺点,本文在两位日本学者的研究基础上结合文献[5]提出的离散余弦变换法,对 JPEG 有损压缩、剪切等图像处理均有很好的稳健性。

2 数字全息

全息最初是由英国科学家伽博(Gabor)于 1948 年提出的^[6],随着计算机技术的飞速发展,全息与计算机相结合发展为数字全息,成为近年来的研究热点^[7~9],应用也越来越广泛^[10~13]。

本文所采用的数字全息为傅里叶变换全息,其原理如下。

2.1 数字全息图的获取

设用于版权保护的物光波的振幅信息为 $m(x, y)$, 相位信息为 $\phi(x, y)$, 其复振幅为

$$g(x, y) = m(x, y)\exp[i\phi(x, y)], \quad (1)$$

其傅里叶变换为

$$G(\xi, \eta) = \iint g(x, y)\exp[-2\pi i(\xi x + \eta y)]dx dy, \quad (2)$$

设参考光波的表达形式如下:

$$R(\xi, \eta) = R_0 \exp[2\pi i(a\xi + b\eta)], \quad (3)$$

式中 a, b 是空间频率, 决定参考光波的传播方向。

则全息面上的强度分布可表示为

$$\begin{aligned} H(\xi, \eta) &= |G(\xi, \eta) + R(\xi, \eta)|^2 = \\ &= |G(\xi, \eta)|^2 + |R(\xi, \eta)|^2 + \\ &= G^*(\xi, \eta)R(\xi, \eta) + \\ &= G(\xi, \eta)R^*(\xi, \eta), \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式中第一、二项为傅里叶变换全息图的晕轮光和

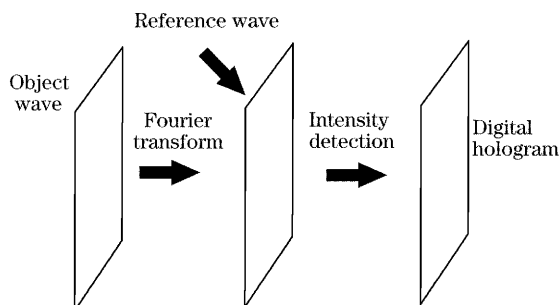


图 1 傅里叶变换数字全息图记录过程

Fig. 1 The recording process of Fourier transform digital hologram

中心亮点,对再现像的质量有很大的影响,应去除:

$$\begin{aligned} H(\xi, \eta) &= G^*(\xi, \eta)R(\xi, \eta) + \\ &= G(\xi, \eta)R^*(\xi, \eta), \end{aligned} \quad (5)$$

(5)式便是记录了物光波振幅和相位信息的全息图函数,也就是原始图像中要嵌入的水印信号。记录过程如图 1 所示。

2.2 全息图的数字再现

全息图的数字再现是用描述照明光的数学表达式和全息图相乘,并进行傅里叶逆变换以获得再现像的光场强度分布,设照明光波为 $S(\xi, \eta) = |S(\xi, \eta)| \exp[i\phi(\xi, \eta)]$, 最简单的情形为 $|S(\xi, \eta)| = 1, \phi(\xi, \eta) = 0$, 在这种情况下再现图像的复振幅为

$$g_R(x, y) = \iint H(\xi, \eta)\exp[2\pi i(\xi x + \eta y)]d\xi d\eta, \quad (6)$$

将(3)式,(5)式代入(6)式并取可得

$$\begin{aligned} g_R(x, y) &= g(x - a, y - b) + \\ &= g^*[-(x + a), -(y + b)], \end{aligned} \quad (7)$$

(7)式表明,原始像和共轭像同时出现在再现平面上,中心分别为 $(a, b), (-a, -b)$,适当地选择参量 a, b 可以调节两个像的位置,这两个复振幅的模便是在计算机上所能看到的再现像,再现过程如图 2 所示(以上所有操作均为计算机模拟)。

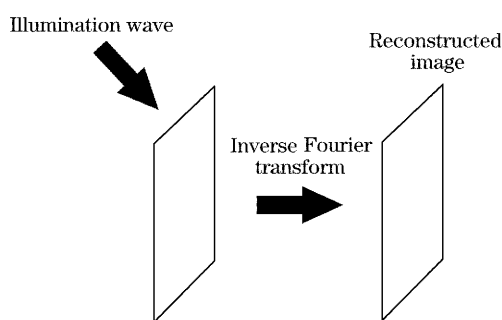


图 2 傅里叶变换全息图再现过程

Fig. 2 The reconstruction process of Fourier transform hologram

3 分解离散余弦变换系数的数字全息图水印算法

在将物光波转变为数字全息图后,嵌入的方法也很重要,为了提高数字全息图水印的抗压缩能力,提出了基于 JPEG 模型和离散余弦变换的方法嵌入数字全息图水印,原理图如图 3 所示。由于离散余弦变换是实变换,它有良好的能量压缩能力,而且可

以充分利用人的视觉系统(HVS)在离散余弦变换域内的特性:即图像信号的能量主要集中在低频部分,随着频率的升高,能量迅速下降,考虑到人眼的主观视觉对高频成分不如对低频成分敏感,可将水印信号加到原始图像的中频成分上,这样含水印图像与原始图像在主观视觉上便不会有什么差别;

同时联合图像专家组压缩主要破坏图像的高频信息,只要压缩比不是很大,中频信息的破坏并不大,加在中频上的水印信号的破坏也较小,由此便提高了水印的抗压缩能力。故本数字全息水印嵌入算法在离散余弦变换域内实现。

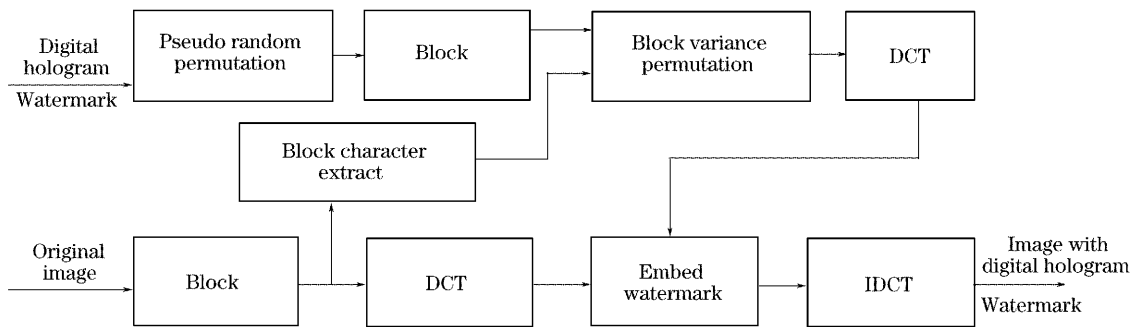


图3 原始图像中嵌入数字全息图水印原理图

Fig. 3 Principle of in the original image the digital hologram watermark embedding

3.1 数字全息图水印的嵌入方法

设 X 是原始图像,大小为 $N_1 \times N_2$; 则

$$X = \{x(i, j), 0 \leq i < N_1, 0 \leq j < N_2\}.$$

设 H 是水印,为归一化至同一灰度级的数字全息图,由(5)式计算得到,大小为 $M_1 \times M_2$; 则

$$H = \{h(i, j), 0 \leq i < M_1, 0 \leq j < M_2\}.$$

3.1.1 原始图像和水印的分块处理

首先将原始图像分割成 $(N_1/8) \times (N_2/8)$ 个 8×8 的图像块 $X_b(k, l)$, k, l 为图像块序号, $0 \leq k < N_1/8, 0 \leq l < N_2/8$ 。

其次为了消除水印像素的空间相关性,进一步提高水印抗剪切的能力,采用二维伪随机排序方法^[14]对水印像素排序,此伪随机序列可由一密钥完全控制,由此提高了水印的安全性。

最后为了得到和原始图像块数量相等且空间位置对应的水印块,将伪随机排序的水印等分成 $(N_1/8) \times (N_2/8)$ 个 $(M_1 \times 8/N_1) \times (M_2 \times 8/N_2)$ 的水印块 $H_b(k, l)$ 。

3.1.2 水印的基块方差排序

要提高嵌入水印的视觉不可见性,就要利用原始图像的固有特性和人的视觉系统的特性。采用对原始图像块和水印块的频率特征(以方差表征)排序的方法提高嵌入水印的不可见性。

分别计算原始图像块和水印块的方差并由大到小排序,按照方差排序的顺序确定原始图像块和水印块的一一对应关系,将每一个水印块移动到相应的原始图像块的空间位置上,即对水印块做基块方

差排序。

3.1.3 分解水印离散余弦变换系数实现水印的嵌入

首先,对原始图像和基块方差排序的水印分别作分块(8×8)离散余弦变换。设离散余弦变换结果分别为 X_{cb} 和 H_{cb} 。

其次,对原始图像块 $X_{cb}(k, l)$ 的64个离散余弦变换系数作“之”字形排序^[15],排序的系数记为 $X_{cb}(k, l)(m)$, ($m = 0, 1, 2, \dots, 63$); 同理对水印块 $H_{cb}(k, l)$ 的 $(M_1 \times 8/N_1) \times (M_2 \times 8/N_2)$ 个离散余弦变换系数作“之”字形排序,排序的系数记为 $H_{cb}(k, l)(n)$, ($n = 0, 1, 2, \dots, [(M_1 \times 8/N_1) \times (M_2 \times 8/N_2) - 1]$)。

设水印块 $H_{cb}(k, l)$ 的一个离散余弦变换系数为 $H_{cb}(k, l)(n)$, 嵌入该系数需要修改相应的原始图像块 $X_{cb}(k, l)$ 的中频系数个数为 K_n , 它们在“之”字形排序中的序号为 m_1, m_2, \dots, m_{K_n} , 它们对应联合图像专家组量化表中的量化系数为 $Q(m_1), Q(m_2), \dots, Q(m_{K_n})$ 。为了提高抗压缩能力,将相应的JPEG量化系数作为修改原始图像中频系数的加权系数,在 $X_{cb}(k, l)$ 中嵌入 $H_{cb}(k, l)(n)$ 的方法如下:

$$X'_{cb}(k, l)(m_i) = X_{cb}(k, l)(m_i) + \alpha \frac{Q(m_i)}{\sum_{j=1}^{K_n} Q(m_j)} H_{cb}(k, l)(n), \quad (8)$$

最后,用 $X'_{cb}(k, l)$ 代替 $X_{cb}(k, l)$ 并对 X'_{cb} 作离散余弦逆变换(IDCT),就得到了含数字全息图水印的图像。

3.2 数字全息图水印的抽取方法

水印的抽取过程如图 4 所示。

首先,将含水印图像和原始图像 8×8 分块并做离散余弦变换。

其次,计算水印的离散余弦变换系数,即将(8)式变形后两次求和求得水印块的离散余弦变换系数。

再次,对离散余弦变换系数进行离散余弦逆变换,将得到的结果基块方差逆排序,像素伪随机逆排序,至此可得到原始图像中嵌入的数字全息图水印。

最后,按照傅里叶变换全息图的再现方法,通过照明光波和傅里叶逆变换得到最终的用于版权保护再现像。

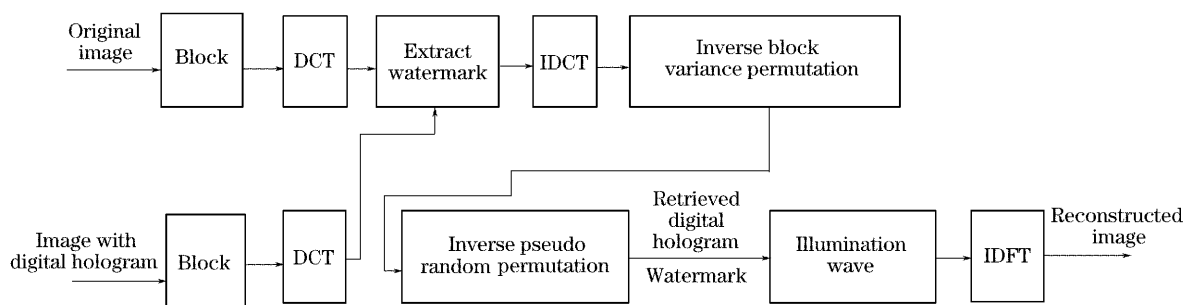


图 4 数字全息图水印的抽取原理及全息像的再现过程

Fig. 4 The retrieving principle of the digital hologram watermark and the reconstruction of the hologram

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(n_{PSNR})对原始数字全息图水印 H 和抽取的数字全息图水印 H_s 的相似性作客观评价,它定义为

$$n_{\text{PSNR}} = 10 \times \lg \frac{(M_1 \times M_2) \times [\max \forall_{i,j} h(i,j)]^2}{\sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} [h(i,j) - h_s(i,j)]^2} \quad (9)$$

4 计算机实验结果

在计算机模拟试验中,首先产生数字全息图,模拟物光波振幅和数字全息图均为 256 灰度级的 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 图像,物光波的相位则由服从正态分布的随机数生成,如图 5 所示。

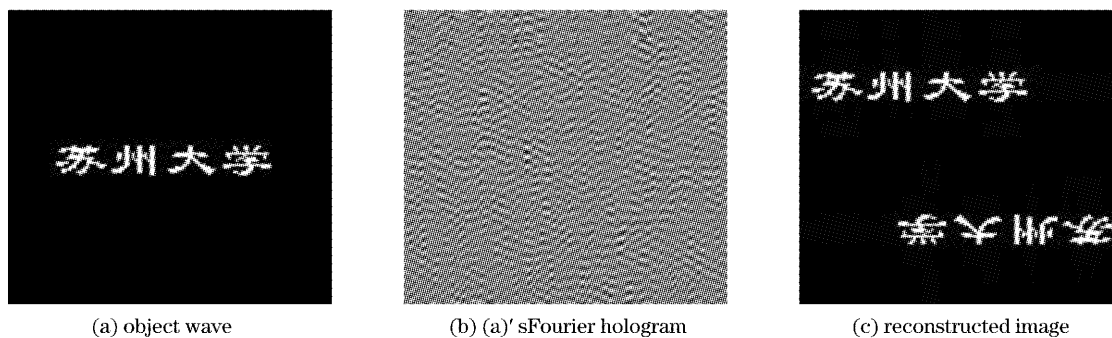


图 5 数字全息的计算机模拟图

Fig. 5 Computer simulation of digital holography

在数字全息图水印嵌入过程中,原始图像为 256 灰度级的 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 图像,水印信号为图 5(b) 所示的数字全息图,实验结果如图 6 所示,图 6 所有图片均有一定程度缩放。

图 6(b) 是在图 6(a) 中嵌入图 5(b) 的含水印图像 ($n_{\text{PSNR}} = 44.71$),在视觉上与图 6(a) 无任何差别,很好地达到了透明性的要求。图 6(c) 为抽取的数

字全息图 ($n_{\text{PSNR}} = 29.74$),图 6(d) 为从含水印图像中得到的最终数字再现像。

在图 6(d) 的中心可以观察到一亮点,这是由于在全息图水印嵌入之前对全息图进行了归一化操作,将(5)式的全息图 $H(\xi, \eta)$ 加上一正常数使得 $H(\xi, \eta)$ 的所有取值均为非负,而常数的傅里叶逆变换是 δ 函数,故在取模之后在中心出现了一个亮点。

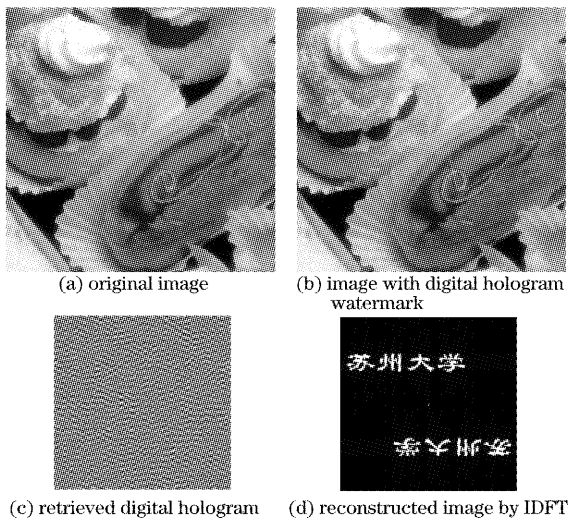


图 6 基于离散余弦变换的数字全息图水印算法
Fig. 6 The digital hologram watermark algorithm based on DCT

4.1 JPEG 有损压缩对抽取数字全息图水印的影响

本算法的提出主要是为了提高数字全息图水印的抗压缩能力,为了验证其对 JPEG 压缩有很好的稳健性,作者特意将日本学者 Nobukatsu Takai 的空间域直接相加算法和本文所采用的算法做同样的压缩,提取,对比实验结果,并分别计算含水印图像的峰值信噪比和抽取的数字全息图水印的峰值信噪比。有损压缩采用 MATLAB 提供的 JPEG 压缩程序,压缩质量越高,相应的图像就越好,但文件尺寸也越大。实验结果如图 7 所示。

由图 7 和表 1,表 2 可以看出,对比日本学者的空间域直接相加算法,本文所采用的算法无论从主观视觉上还是从客观峰值信噪比上对 JPEG 有损压缩均有明显的改善,体现了很强的稳健性。

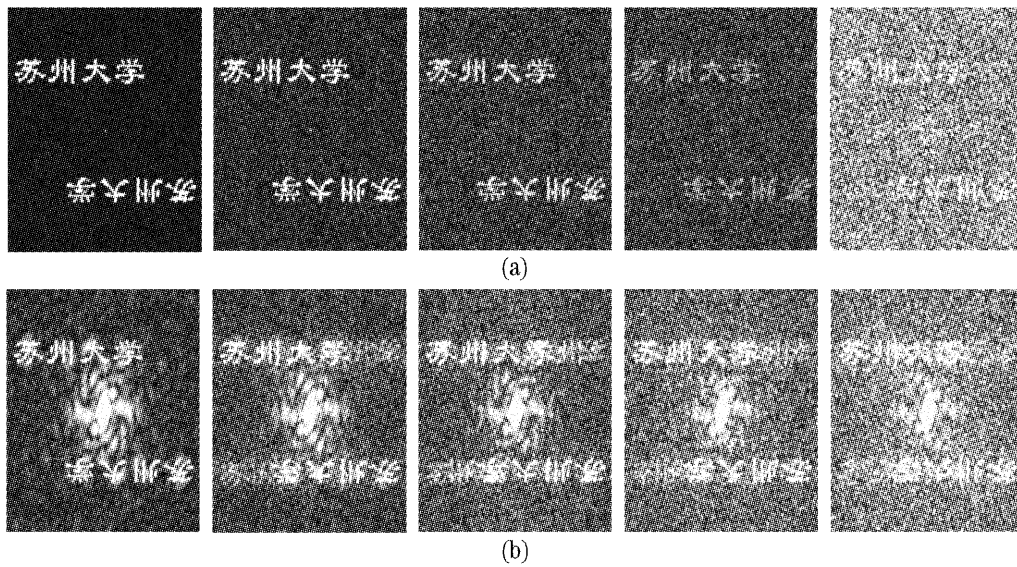


图 7(a) 本文所采用的算法经 JPEG 压缩后提取的再现像(压缩质量分别为 100,95,90,85,70), (b) 空间域直接相加算法经 JPEG 压缩后提取的再现像(压缩质量分别为 100,95,90,85,70)

Fig. 7 (a) The reconstructed image after JPEG compression by this paper's algorithm (compression quality is 100, 95, 90, 85, 70 respectively), (b) the reconstructed image after JPEG compression by spatial directly adding method (compression quality is 100, 95, 90, 85, 70 respectively)

表 1 本文所采用的算法经 JPEG 压缩后的峰值信噪比

Table 1 PSNR after JPEG compression by this paper's algorithm

JPEG compression quality	100	95	90	85	70
PSNR of the image with watermark /dB	44.41	42.27	41.30	39.91	37.15
PSNR of the retrieved digital hologram watermark /dB	27.27	21.81	18.80	17.43	9.91

表 2 空间域直接相加算法经 JPEG 压缩后的峰值信噪比

Table 2 PSNR after JPEG compression by spatial directly adding method

JPEG compression quality	100	95	90	85	70
PSNR of the image with watermark /dB	34.25	33.14	31.73	30.03	28.14
PSNR of the retrieved digital hologram watermark /dB	15.29	12.11	10.18	8.98	5.46

对比图 7(a)和图 7(b)可以发现,日本学者的空间域直接相加算法在经 JPEG 压缩后在中心区域出现了梅花状的干扰图案,并且噪声也比较强。由于在生成傅里叶变换全息图的时候已经将零级去除,仅保留了原始像和共轭像两项,因此图 7(b)中心的梅花状干扰图案并不是傅里叶变换全息图的零级。它的出现是由于经压缩后提取的全息图出现了一定数量的零值,等于在原全息图基础上加上了若干个负的近似的二维矩形函数,而矩形函数的傅里叶逆变换是具有一定宽度的 sinc 函数,取模后再现像便出现了图 7(b)中心的梅花状图案。日本学者的算法是将全息图按一定比例衰减后直接加在原始图像的低位,加入的全息图水印信号对原始图像而言属于细节信息,而 JPEG 压缩对于细节信息(在频域中对应为高频成分)的破坏是很严重的,所以经压缩后提取的全息图会受到比较大的破坏,还会出现一定数量的零值,导致再现像中心出现梅花状图案,噪声也比较大。本文

所用方法是在离散余弦变换域将全息图水印信号的离散余弦变换系数加在原始图像的中频成分上,由于 JPEG 压缩在压缩比不是非常大的情况下主要破坏图像的高频成分,所以对加在中频上的全息图水印信号影响不大,经离散余弦逆变换提取的全息图基本上不会出现零值,噪声也比较弱,因此再现像也不会出现图 7(b)那样的梅花状图案,整体质量也较好。

4.2 剪切操作对抽取数字全息图水印的影响

考虑到数字全息图的不可撕毁性,即用数字全息图的一部分便能恢复再现像,因此采用数字全息图作为水印信号本身就具有较好的抗剪切能力,加之又采用了伪随机、基块方差排序等操作,进一步加强了抗剪切能力。在实验中,对含水印图像进行剪切,剪切掉的部分以黑色填充,然后提取水印。含水印图像剩余百分数指的是含水印图像的剩余部分占整幅图像的百分数。实验结果如图 8、表 3 所示。

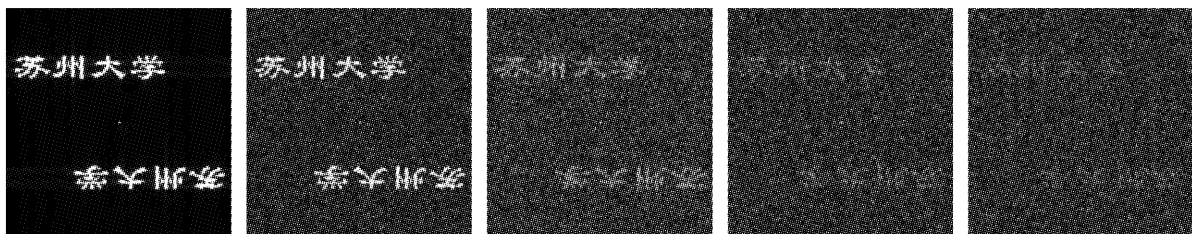


图 8 不同剪切操作下提取的再现像(含水印图像剩余百分数分别为 100%,90%,70%,50%,30%)

Fig. 8 The reconstructed image after different cropping by this paper's algorithm (the remaining percentage of watermarked image is 100%, 90%, 70%, 50%, 30% respectively)

表 3 不同剪切操作下的峰值信噪比

Table 3 PSNR after different cropping by this paper's algorithm

The remaining percentage after cropping /%	100	90	70	50	30
PSNR of the image with watermark /dB	44.71	15.67	10.15	7.23	6.41
PSNR of the retrieved digital hologram watermark /dB	29.74	11.45	6.33	4.81	2.59

由图 8 和表 3 可以看出,本算法在剩余部分超过 50%的情况下提取的再现像有较好的质量,在剩余部分仅为 30%时再现像的破坏比较严重,但仍能依稀辨别版权信息。所以从总体上来说,该算法具有较好的抗剪切能力。

5 结 论

提出了一种在二维图像中嵌入数字全息图水印信号的算法,经提取再现可获得具有振幅及位相信息的再现像。嵌入全息图水印采用了基于 JPEG 模型和离散余弦变换系数分解的方法,有效地解决了空间域直接相加所无法克服的抗压缩问题,采用了密钥加

强了三维版权信息的安全性。经计算机模拟表明,该算法提取的用于版权保护的再现像对有损压缩和剪切等图像处理均有很好的稳健性。

参 考 文 献

- 1 Sun Shenghe, Lu Zheming. Digital watermarking techniques[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, **28**(8): 85~90 (in Chinese)
孙圣和,陆哲明. 数字水印处理技术[J]. *电子学报*, 2000, **28**(8): 85~90
- 2 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 (in Chinese)
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
- 3 Peng Xiang, Zhang Peng, Niu Hanben. Information hiding theory based on virtual optics and its implementation with parallel

- hardware[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 623~627 (in Chinese)
- 彭翔,张鹏,牛慈笨. 虚拟光学信息隐藏理论及并行硬件实现[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 623~627
- 4 Nobukatsu Takai, Yuto Mifune. Digital watermarking by a holographic technique[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(5): 865~873
- 5 Jiang Gangyi, Yu Mei, Chen Xiaoming *et al.*. New efficient approach to digital image watermarking [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2002, **116**(13): 116~119 (in Chinese)
- 蒋刚毅,郁梅,陈晓明等. 一种有效的数字图像水印新方法[J]. *计算机工程与应用*, 2002, **116**(13): 116~119
- 6 Su Xianyu, Li Jitao. *Information Optics* [M]. Beijing: Science Press, 1999. 111~117 (in Chinese)
- 苏显渝,李继陶. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 111~117
- 7 Zhong Liyun, Zhang Yimo, Lü Xiaoxu *et al.*. Some quantitative analysis about digital holographic reconstructed image[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(5): 570~574 (in Chinese)
- 钟丽云,张以谟,吕晓旭等. 数字全息图再现像的分析计算[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5): 570~574
- 8 Liu Cheng, Li Liangyu, Li Yinzhu *et al.*. Digital holography free of zero-order diffraction and conjugate images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(4): 427~431 (in Chinese)
- 刘诚,李良钰,李银柱等. 无直透光和共轭像的数字全息[J]. *光学学报*, 2002, **22**(4): 427~431
- 9 Wang Yingzong, Zhen Yankun, Zhang Hongjun *et al.*. Study on digital holography with single phase-shifting operation[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(3): 141~143
- 10 Zhao Jianlin, Tan Haiyun. Measuring three-dimensional temperature field by digital holographic interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(12): 1447~1451 (in Chinese)
- 赵建林,谭海蕴. 电子学全息干涉术用于温度场测量[J]. *光学学报*, 2002, **22**(12): 1447~1451
- 11 Xiong Bingheng, Wang Zhengrong, Zhang Yongan *et al.*. A novel testing method of transparent object in real-time holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(7): 841~845 (in Chinese)
- 熊秉衡,王正荣,张永安等. 实时全息术检测透明物的一种新方法[J]. *光学学报*, 2001, **21**(7): 841~845
- 12 He Anzhi, Yao Hongbing, Wu Yingchuan *et al.*. Color coding of computational interference for holographic interferogram in complex flow field[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(3): 348~351 (in Chinese)
- 贺安之,姚红兵,吴颖川等. 复杂流场全息干涉图的计算干涉编码处理[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(3): 348~351
- 13 Enrique Tajahuerce, Osamu Matoba, Bahram Javidi. Shift-invariant three dimensional object recognition by means of digital holography[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(23): 3877~3886
- 14 Hsu Chiouting, Wu Jaling. Hidden digital watermarks in images [J]. *IEEE Trans. Image Proc.*, 1999, **8**(1): 58~68
- 15 Hu Jianzhang, Li Wei, Chen Jiangtao. JPEG-algorithm and implementation [J]. *J. Nanjing Institute of Posts and Telecommunications*, 1994, **14**(3): 43~50 (in Chinese)
- 胡建新,李炜,陈江涛. JPEG-算法与实现[J]. *南京邮电学院学报*, 1994, **14**(3): 43~50