

文章编号: 0253-2239(2007)06-1011-7

半色调编码计算全息图的数字水印方法^{*}

彭 翔 白伟东 田劲东

(深圳大学光电子学研究所教育部光电子器件与系统重点实验室, 深圳 518060)

摘要: 提出一种新的基于信息光学的数字水印方法。该方法将水印信息隐藏于半色调编码的计算全息图之中。通过相位复原技术将需隐藏的水印信息编码为相位函数嵌入在复波前中,其振幅定义为宿主图像,通过计算全息记录复波前并对全息图进行半色调编码完成水印信息的嵌入。水印的提取过程只需对含有水印信息的半色调图像进行光学或数字的傅里叶变换即可完成。并给出了算法有效性的理论分析和仿真实验结果。结果证明这种水印技术对于各种数字图像处理操作具有很高的稳健性,且半色调编码图的二值特性使嵌入水印具有很强的抗打印、抗复印、抗扫描的能力。

关键词: 信息光学; 信息隐藏; 数字水印; 计算全息; 半色调编码

中图分类号: O438; TP309.7 文献标识码: A

Digital Watermarking with Half-Tone Encoded Computer-Generated Hologram

Peng Xiang Bai Weidong Tian Jindong

(Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems, Ministry of Education, Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen 518060)

Abstract: A new approach of digital watermark based on information optics is presented. The watermark information is hidden in a halftone encoded computer-generated hologram. The watermark is encoded as a phase function of wave front by means of phase retrieval technique while the host information is taken as the amplitude of wavefront. Furthermore, the encoded wavefront is recorded through the computer generated hologram, and followed by a halftone encoding to achieve the watermark embedding process. The watermark can be retrieved by using either optical or digital Fourier transform on halftone images containing the watermarked information. The simulation results are presented and show good agreement with theoretical analysis. It is shown that the proposed watermarking technique is robust to various image processing operations. The binary characteristic of halftone encoded image grants the embedded watermark the ability to resist printing, hardcopy and scanning.

Key words: information optics; information hiding; digital watermark; computer-generated hologram; halftone encoding

1 引 言

近年来,随着数据安全和知识产权保护的需求日益迫切,数字水印技术的研究受到广泛关注并成为研究热点。光学数字水印技术具有诸如并行性、多维度、高安全强度等固有的优点。光学信息隐藏算法大致可以分为两类。第一类是基于双随机相位

编码的信息隐藏算法^[1~3],第二类是基于数字全息编码的信息隐藏算法^[4~9]。这两类算法分别利用了双随机编码和全息编码对水印信息进行加密和置乱以保证水印信息的安全性和不可感知性。其他算法还包括光波传播的空间多维技术^[10]和基于菲涅耳衍射的水印算法^[11]。然而,这些算法目前的稳健性

^{*} 国家自然科学基金(60472107)、广东省自然科学基金(04300862)、深圳市科技计划项目(200426)和中国科学院微系统与信息技术研究所资助的课题。

作者简介: 彭 翔(1955—),男,湖北人,教授,博士生导师,主要从事三维数字成像及造型、光学信息安全、现代光学测试技术方面的研究。E-mail: xpeng@szu.edu.cn

收稿日期: 2006-09-01; 收到修改稿日期: 2006-11-17

缩放操作。将编码图尺寸缩放为原大小的1/2、1/4、1/8后提取水印信息,结果如图15所示。

滤波操作。对编码图作 3×3 的均值滤波操作

和 3×3 的高斯低通滤波。其中,参量 $\sigma=0.5$ 。结果如图16所示。

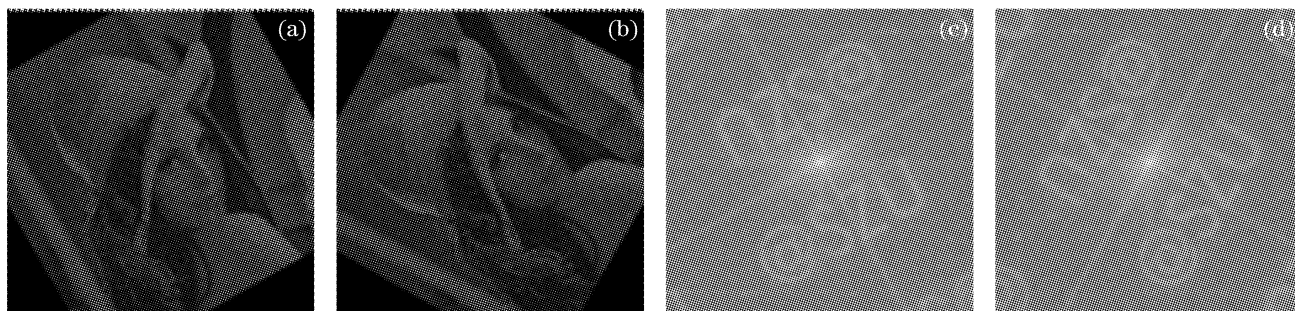


图14 旋转操作的结果,(a) 30° , (b) 60° , (c) 图(a)的傅里叶谱零级部分, (d) 图(b)的傅里叶谱零级部分

Fig. 14 Image after rotation operation, (a) 30° , (b) 60° , (c), (d) watermark extraction from rotated images (a) and (b) with zero-order Fourier spectrum

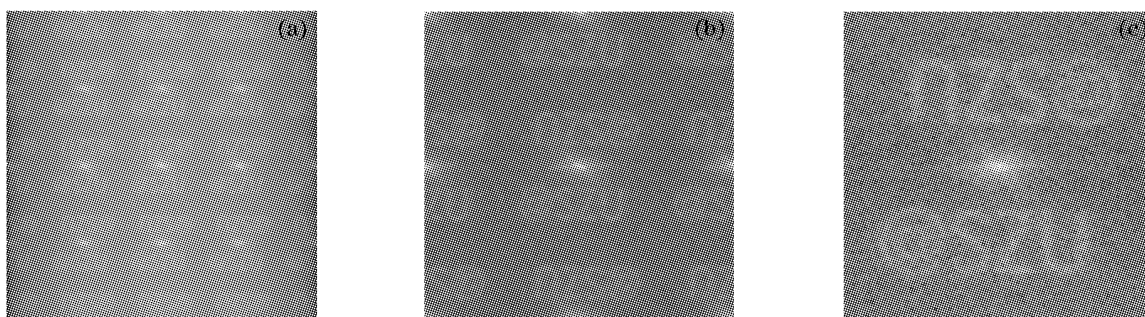


图15 从比例缩放后的编码图提取的水印,缩小比例:(a) 1/2, (b) 1/4, (c) 1/8

Fig. 15 Watermark extracted from scaled encoded computer-generated hologram, zoomed scales: (a) 1/2, (b) 1/4, (c) 1/8

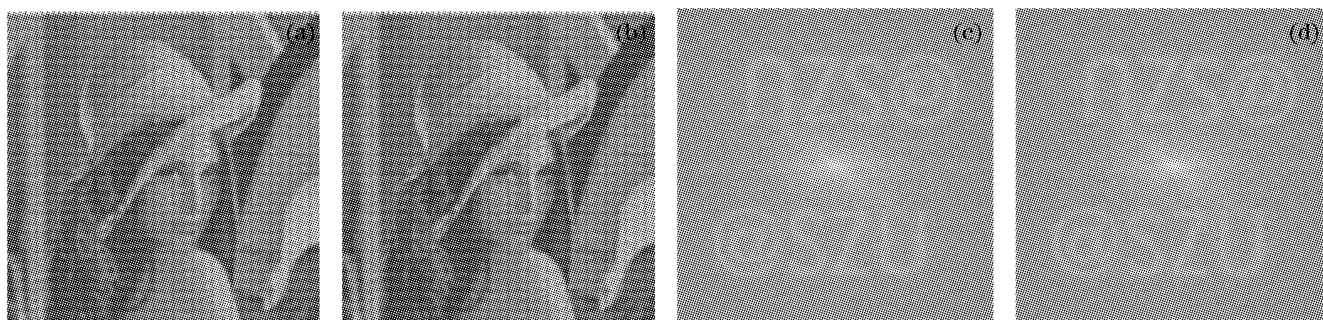


图16 对编码图进行滤波操作结果,(a) 3×3 的均值滤波结果, (b) 3×3 高斯低通滤波结果,参量 $\sigma=0.5$, (c), (d)分别为图(a), (b)的傅里叶谱零级部分

Fig. 16 Filtering operation, (a) 3×3 median filter, (b) 3×3 Gaussian lowpass filter, $\sigma=0.5$, (c), (d) extracted watermark from (a), (b) with zero-order Fourier spectrum

以上结果显示,本算法具有很好的稳健性。在对加载水印信息的图像进行各种操作后,仍可以成功提取到所隐藏的水印信息。

5 结 论

本文提出了一种将水印信息隐藏于半色调编码全息图像中的方法。该方法将水印信息编码在以宿主图像为振幅的复波前的相位之中,并通过计算全息

技术记录和半色调编码,使得水印图像每一点的信息都被记录于宿主信息的整体之中。这种信息隐藏方法具有很强的稳健性。信息隐藏于半色调编码图中,既保留了宿主信息的可辨识度又具备了二值图像的抗噪声能力。同时,隐藏于半色调编码图中的水印图像信息不会因为打印或复印操作而丢失。本文通过仿真实验验证了所提出的方法的可行性,并验证了加载水印的图像对各种图像操作的稳健性。

参 考 文 献

- 1 R. K. Wang, I. A. Watson, C. Chatwin. Random phase encoding for optical security[J]. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(9): 2464~2469
- 2 X. F. Meng, L. Z. Cai, M. Z. He *et al.*. Cross-talk-free double-image encryption and watermarking with amplitude-phase separate modulations[J]. *J. Opt. A; Pure Appl. Opt.*, 2005, **7**(11): 624~631
- 3 S. Kishk, B. Javidi. Information hiding technique with double phase encoding[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(26): 546~547
- 4 B. Javidi, T. Nomura. Securing information by use of digital holography[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1): 28~30
- 5 S. Kishk, B. Javidi. Watermarking of three-dimensional objects by digital holography[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(3): 167~169
- 6 Nobukatsu Takai, Yuto Mifune. Digital watermarking by a holographic technique[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(5): 865~873
- 7 Sherif Kishk, B. Javidi. 3D object watermarking by a 3D hidden object[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(8): 874~888
- 8 Shaogeng Deng, Liren Liu, Haitao Lang *et al.*. Hiding an image in cascaded Fresnel digital holograms[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(5): 268~271
- 9 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 (in Chinese)
- 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
- 10 Xiang Peng, Lingfeng Yu, Lilong Cai. Digital watermarking in three dimensional space with a virtual-optics modality[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **226**(16): 155~165
- 11 Mi Jian, Zhang Chunxi, Li Zheng *et al.*. Effect of polarization interference on fiber optic Gyro performance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1140~1144 (in Chinese)
- 米 剑, 张春熹, 李 铮 等. 偏光干涉对光纤陀螺性能的影响[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1140~1144
- 12 Joseph Rosen, B. Javidi. Hidden images in halftone pictures[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(20): 3346~3353
- 13 J. R. Fienup. Phase retrieval algorithms; a comparison[J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(15): 2758~2769
- 14 E. Wolf. *Progress in Optics* [M]. New York: Elsevier, 1978. 119~223
- 15 J. C. Stoffel, J. F. Moreland. A survey of electronic techniques for pictorial reproduction[J]. *IEEE Trans. on Communications*, 1981, **29**(12): 1898~1925
- 16 D. Kermisch, P. G. Roetling. Fourier spectrum of halftone images[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1975, **65**(6): 716~723

$$\mathcal{F}\{h(n,m)\} = \mathcal{F}\{f(n,m)(1-\tau)\} + \mathcal{F}\{f(n,m)\tau\cos[2\pi\alpha n - \phi(n,m)]\}, \quad (11)$$

其中 $\mathcal{F}\{f(n,m)(1-\tau)\}$ 为原复波前振幅乘以常数权重的傅里叶变换, 而第二项可表示成

$$\begin{aligned} & \mathcal{F}\{f(n,m)\tau\cos[2\pi\alpha n - \phi(n,m)]\} = \\ & \mathcal{F}\{f(n,m)\tau\exp[-j\phi(n,m)]\exp(j2\pi\alpha n) + f(n,m)\tau\exp[j\phi(n,m)]\exp(-j2\pi\alpha n)\} = \\ & \tau\mathcal{F}\{f(n,m)\exp[-j\phi(n,m)]\} \otimes \delta(u+\alpha) + \tau\mathcal{F}\{f(n,m)\exp[j\phi(n,m)]\} \otimes \delta(u-\alpha), \end{aligned} \quad (12)$$

(2)式包含了在 $\alpha=(u_c, v_c)$ 的邻域内所得到的原复波前的傅里叶变换。由(1)式和(12)式知, 在透镜的后焦面上即可以得到所隐藏的图像。

4 仿真实验

为证明本文所提出方法的可行性与稳健性, 我们在 Matlab 软件的环境下对算法进行了仿真实验验证。其中包括, 水印信息隐藏过程和水印提取过程; 水印信息对于各种图像操作的稳健性检验。

4.1 信息隐藏过程和提取过程的验证

首先选取两幅 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 的图像分别作为宿主信息和水印信息。如图 4、图 5 所示。

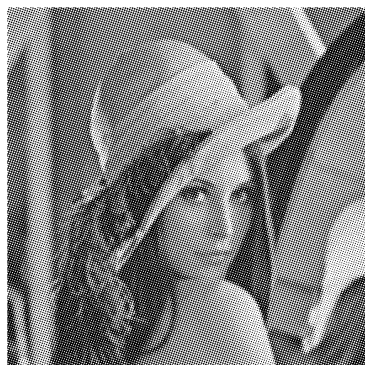


图 4 宿主图

Fig. 4 Host image



图 5 需隐藏图像

Fig. 5 Watermark to be hidden

通过 GS 算法迭代计算出以图 4、图 5 分别为输入面振幅和输出面振幅约束的波前的相位函数。在仿真过程中 GS 算法迭代 100 次, 结果为相角介于 $(0, 2\pi)$ 之间的二维相位函数。如图 6 所示。以

图 4 作为振幅, 图 6 作为相位函数, 利用调整离轴参考光的办法制作计算全息图, 其中参量 $\tau=0.1$, $\alpha=0.5$ 。所得全息图如图 7 所示。

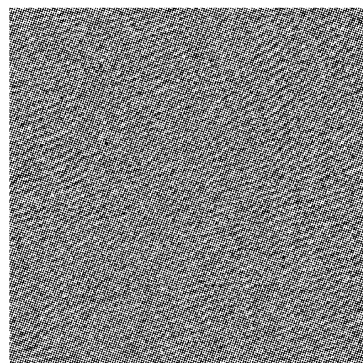


图 6 编码的相位函数

Fig. 6 Phase function of encoding



图 7 计算全息图

Fig. 7 Computer-generated hologram

然后, 对上述计算全息图做半色调编码。在编码过程中, 取像元尺寸 $d_x=8, d_y=8$, 像元中 $w=4$ 。计算全息图中每个像元对应 $8 \text{ pixel} \times 8 \text{ pixel}$ 的, 所



图 8 半色调编码图

Fig. 8 Halftone encoded hologram

以半色调编码图为 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ 。如图 8 所示。在信息提取过程中,对所得半色调编码图做傅里叶变换。所得结果如图 9 所示,半色调编码图局部及其带通频谱如图 10、图 11 所示。

可见,只需通过对编码全息图进行简单的傅里叶变换就可以完成对水印信息的提取。通过修改参量 τ 并反复进行仿真实验,发现当 $\tau > 0.05$ 时提取水印均清晰可见,水印提取质量不受参量 α 影响。

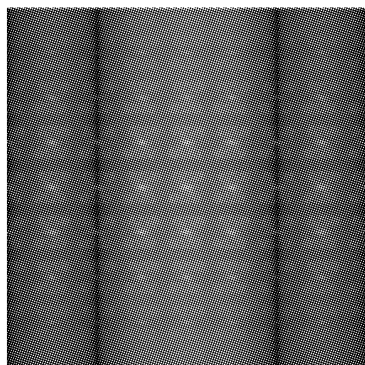


图 9 半色调编码图的频谱

Fig. 9 Fourier spectrum of halftone encoded hologram

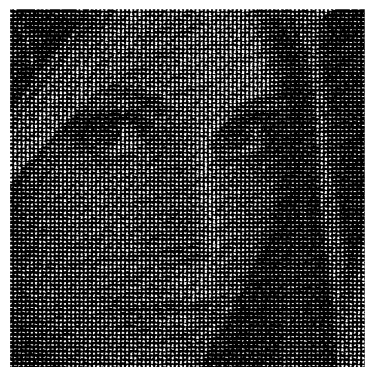


图 10 半色调编码图局部

Fig. 10 Part of halftone encoded computer-generated hologram

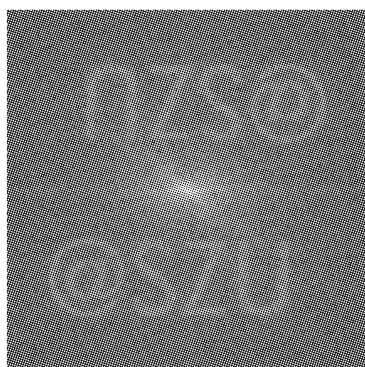


图 11 频谱面提取出的隐藏信息零级部分

Fig. 11 Zero-order part of retrieved hiding information on spectrum

4.2 算法的稳健性检验

为了验证算法的稳健性,我们分别对同一幅隐

藏水印信息的半色调编码图进行剪切、缩放、旋转和滤波操作,然后考察水印提取的结果。

剪切操作。分别截去占编码图面积 6.25%, 25%, 50%, 61% 的部分,然后从残缺的编码图提取水印信息,结果如图 12、图 13 所示。

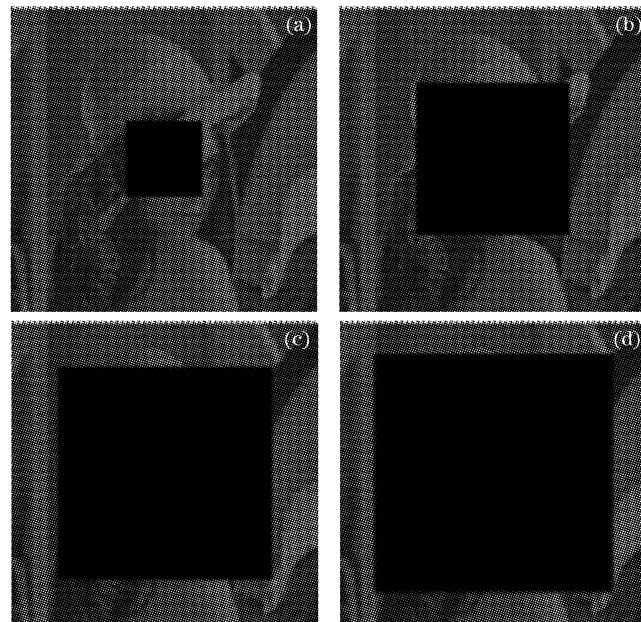


图 12 对编码图进行剪切的结果,分别截去:(a) 6.25%, (b) 25%, (c) 50%, (d) 61%

Fig. 12 Clipping of encoded image with different percentage. (a) 6.25%, (b) 25%, (c) 50%, (d) 61%

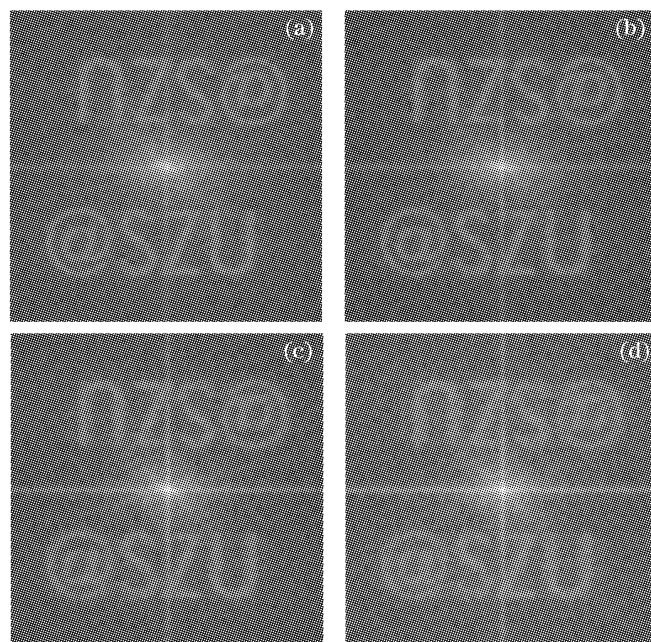


图 13 由剪切后编码图提取出水印信息的零级部分

Fig. 13 Watermark extracted from clipped image with zero-order Fourier spectrum

旋转操作。将编码图分别旋转 30° , 60° , 旋转后超出图像边界部分被剪切掉。然后进行水印信息提取,结果如图 14 所示。

仍然存在各种问题,而且嵌入的水印信息通常会因为打印而丢失。为此,Rosen 和 Javidi 最近提出在半色调编码图中隐藏图像信息的方法^[12]。由于该方法在记录水印信息时使用了点簇位置调制(DPM),因此使得点簇位置调制对每个点簇像元的位置进行了偏移,并由此降低了半色调编码图的质量和可辨识性,这与水印嵌入算法的构造原则相悖。

本文提出一种新的数字水印方法。该方法利用相位复原技术将需隐藏的水印信息隐藏在复波前的相位中,复波前的振幅定义为宿主图像。复波前通过计算全息图记录,然后进行半色调编码,完成水印信息的嵌入。水印的提取过程只需通过简单的光学或数字傅里叶变换即可完成。本文还对所提出的数字水印方法的稳健性进行了分析和验证。

2 水印信息的嵌入方法

本文提出的水印嵌入过程分三个步骤实现,如图 1 所示:首先利用相位复原算法求得满足编码条件的相位函数。其次,以计算全息(CGH)的方式记录隐藏有特定相位信息的复波前。所获得的计算全息图可看作是在已知的振幅图像中加入了隐藏的水印信息。最后,对计算全息图进行半色调编码,完成水印嵌入过程。

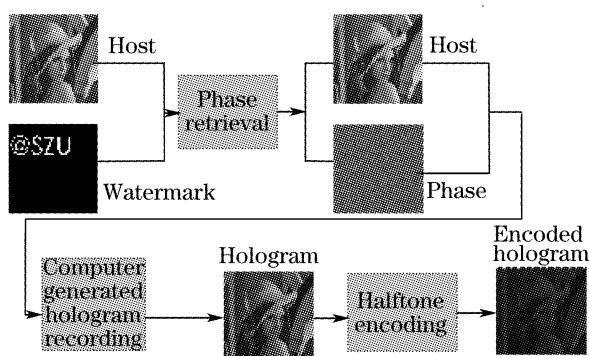


图 1 水印嵌入过程原理图

Fig. 1 Scheme of watermark embedding

2.1 利用相位复原算法计算输入面相位

假设给定宿主图像 $f(x, y)$ 和需要隐藏的水印图像为 $g(u, v)$ 。若将 $f(x, y)$ 和 $g(u, v)$ 分别作为透镜前焦面的输入和后焦面的输出振幅,则需要利用相位恢复算法求得满足(1)式条件的相位函数 $\exp[j\phi(x, y)]$:

$$|\mathcal{F}\{f(x, y)\exp[j\phi(x, y)]\}| = g(u, v), \quad (1)$$

为此,采用 R. Gerchberg 等^[13]提出的 GS 算法来确定相位函数 $\phi(x, y)$ 。GS 算法的基本思想是:首先以随机相位分布和已知的振幅分布作为初始波前函

数,通过傅里叶变换,获得频谱平面上的波前函数。此时,引入频谱平面上的限制条件,即保持相位不变,但振幅变为所要求的振幅分布。然后,将新的频谱平面上的波函数作逆傅里叶变换,获得物面上的波前函数。此时,再引入物面上的限制条件,即保持相位不变,振幅变为预先已知的物面的振幅分布,作为下一次迭代的输入物波函数。反复迭代至满意结果。迭代步骤描述如下:

1) 初始输入波前振幅为 $f(x, y)$, 初始相位 $\exp[j\phi(x, y)^{(0)}]$ 为随机分布。输出面振幅约束设为 $g(x, y)$ 。并对初始输入做傅里叶变换得到 $\mathcal{F}\{f(x, y)\exp[j\phi(x, y)^{(0)}]\}$ 。

2) 迭代停止条件判断。求输出振幅 $\mathcal{F}\{f(x, y)\exp[j\phi(x, y)^{(n)}]\}$ 。与输出面约束的均方根误差(MSE),如果均方根误差小于 0.05, 停止迭代,相位函数为 $\phi(x, y)^{(n)}$, 否则继续下一步骤。

3) 以 $g(u, v)$ 替换输出面振幅并做逆傅里叶变换 $\mathcal{F}^{-1}\{g(u, v)\exp[j\phi(u, v)^{(n)}]\}$, $n+1$ 次迭代输入相位 $\exp[j\phi(x, y)^{(n+1)}]$ 为该逆傅里叶变换的相位函数,输入振幅仍设为 $f(x, y)$, 并求该输入的傅里叶变换 $\mathcal{F}\{f(x, y)\exp[j\phi(x, y)^{(n+1)}]\}$, 重复步骤 2)。

选择 $f(x, y)$ 作为物面约束, $g(u, v)$ 作为傅里叶变换后的谱面的约束。通过迭代便可求得满足条件的相位函数 $\exp[j\phi(x, y)]$ 。当这一过程完成后,即获得了水印编码信息的复波前的构造,即信息隐藏。

2.2 产生计算全息图

在步骤 1) 中获得的隐藏有特定图像信息的复波前是复函数,所以需要利用计算全息的方法来记录该复波前。Huang 等^[14]曾提出一种调整离轴参考光束的计算全息方法,该计算全息图可描述为以下透射率函数:

$$t(x, y) = 0.5A(x, y)\{1 + \cos[2\pi\alpha x - \phi(x, y)]\}, \quad (2)$$

从(2)式可见,所得透射率函数与物波振幅相似。

本文算法在(2)式的基础上做适当的调整,使其能更好地满足所得的计算全息图与物光波振幅图像相似的条件。描述如下:

$$t(x, y) = A(x, y)\{(1 - \tau) + \tau\cos[2\pi\alpha x - \phi(x, y)]\}, \quad (3)$$

与 Huang 等提出的方法相比,我们去掉了对透射率函数整体所乘的常数因子,并用一个权重因子 τ 来调整透射率函数中的正弦项的权重($0 \leq \tau \leq 0.5$),同时可以用 α 来调整参考波在 x 方向的空间频率。从

而对计算全息图进行优化,使其与被记录的复波前 $f(x, y) \exp[j\phi(x, y)]$ 振幅间误差最小。记录复波前的计算全息图以数字图像中像素点的序数为坐标,表示为 $h(n, m)$ 。

2.3 半色调编码

常用的半色调化方法可以分为两类,一类是点簇尺寸调制或者振幅调制(AM),另一类是点簇位置调制或频率调制(FM)^[15]。本算法中用点尺寸调制来调制计算全息图。在半色调编码中,一种常用的方法就是将不同的色阶值表示为一个二值的固定大小点簇中非零点的区域大小。这种方法类似于通信理论中的脉冲宽度调制(PWM)。编码过程如图 2 所示。

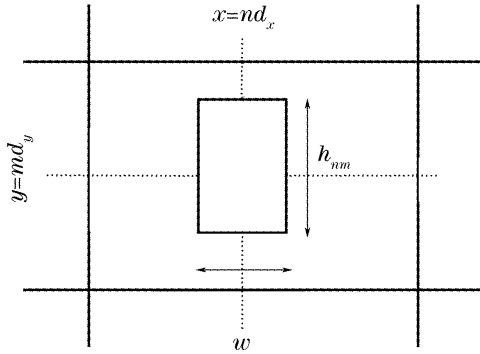


图 2 点簇尺寸调制半色调编码原理图

Fig. 2 Schematic illustration of halftone encoding modulated by cluster scale

其中, n, m 为计算全息图中的像素坐标, x, y 表示半色调编码图中像元的位置。编码过程中每一连续色调像素被编码为宽度和高度分别为 d_x 像素和 d_y 像素的二值区域,即像元。像素 $h(n, m)$ 的灰度值被表示为对应像元中非零值区域的面积大小 $w \times h_{nm}$ 。若令 w 为常数,则忽略该常数因子,在编码之前需将 $h(n, m)$ 由原灰度阶数量化为 d_y 阶并归一化,则 h_{nm} 与 $h(n, m)$ 关系为

$$h_{nm} = h(n, m)d_y, \quad (4)$$

其中 $h_{nm} = 0, 1, 2, 3, \dots, d_y$ 。因此,半色调编码之后所获得的计算全息图 $h(n, m)$ 可表达为(5)式中的透射率函数 $t_h(x, y)$

$$t_h = \sum_n \sum_m \text{rect}\left(\frac{x - nd_x}{w}\right) \text{rect}\left(\frac{y - md_y}{h_{nm}}\right), \quad (5)$$

其中 $\text{rect}(x), \text{rect}(y)$ 为矩形函数。

3 水印信息的提取方法

水印信息的提取只需对含水印信息做傅里叶变换即可。在光电混合系统实现中,水印嵌入各步骤

由计算机软件完成,水印的提取由光学器件完成。由光学器件实现水印提取时,可将编码图写入空间光调制器(SLM)中,用平面波照明,经过透镜在透镜后焦面上便可提取出水印信息,如图 3 所示。

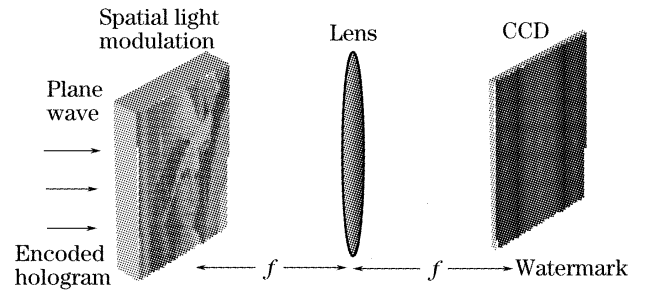


图 3 水印提取装置图

Fig. 3 Scheme of watermark extraction

对于(5)式中的透射率函数 $t_h(x, y)$,考察其傅里叶变换^[16]:

$$T_h = \iint_{-\infty-\infty}^{\infty\infty} t_h(x, y) \exp[-j2\pi(ux + vy)] dx dy = \sum_n \sum_m G_{nm}(u, v) \exp[-j2\pi(nd_x u + md_y v)], \quad (6)$$

其中

$$G_{nm}(u, v) = \frac{\sin(\pi w u)}{\pi u} \frac{\sin(\pi h_{nm} v)}{\pi v}, \quad (7)$$

令 $u_c = k/d_x, v_c = 0, k$ 为衍射级次。因为 t_h 在 x 方向是周期函数,因此它的傅里叶变换在 u 方向是傅里叶级数展开,其展式的系数 $G_{nm}(u, v)$ 与 u 无关。然而, t_h 在 y 方向是非周期函数,因此它的傅里叶变换 $G_{nm}(u, v)$ 是 v 的函数。

将 $G_{nm}(u, v)$ 在 $|u - u_c| \leq \frac{1}{d_x}, |v - v_c| \leq \frac{1}{2d_y}$ 部分做级数展开可得

$$G_{nm}(u, v) = \frac{\sin(\pi w u)}{\pi u} h_{nm} \times \left[1 - \frac{(\pi v h_{nm})^2}{6} + \dots \right], \quad (8)$$

代入(7)式得

$$T_h = \frac{\sin(\pi w u)}{\pi u} \sum \sum (1 - Q_{nm}) h_{nm} \times \exp[-j2\pi(nd_x u + md_y v)], \quad (9)$$

其中

$$Q_{nm} \approx [\pi v d_y h(n, m)]^2 / 6, \quad (10)$$

Q_{nm} 可视为一误差项,可以看出 T_h 在 $|u - u_c| \leq 1/d_x, |v - v_c| \leq 1/(2d_y)$ 区域内是原计算全息图 $h(n, m)$ 的傅里叶变换 $H(u, v)$ 乘以一误差项。由于离散化的原因, $T_h(u, v)$ 为 $H(u, v)$ 的周期性分布。其中, $H(u, v)$ 是 $h(n, m)$ 的傅里叶变换。

由(3)可知, $h(n, m)$ 的傅里叶变换可表示为