

文章编号: 0253-2239(2006)08-1145-5

基于光学菲涅耳衍射的“盲数字水印”技术

黄清龙¹ 刘建岚²

(¹ 杭州电子科技大学理学院, 杭州 310037
² 杭州电子科技大学电子信息学院, 杭州 310037)

摘要: 基于光学菲涅耳衍射,设计了一种新的“盲数字水印”计算方法。水印图像通过离散菲涅耳衍射变换成一复矩阵,将此复矩阵的实部和虚部分开,分别嵌入到宿主图像的不同位置中。通过将水印嵌入点的宿主图像的像素值更改为其近邻像素值的均值,而实现“盲水印”的提取。数值计算结果表明:该水印算法对像素变换攻击具有很强的鲁棒性,如图像亮度、对比度和灰度曲线的调整;能抵抗 JPEG 有损压缩、剪切和噪声污染攻击;能抵抗对图像的重采样攻击,可从显示屏拷贝的图像中提取水印。由于该方法为使用者提供了灵活的水印嵌入方式和双重密钥的选取,以及提取水印不需要原始图像数据,因而使该方法具有很高的安全性和实用价值。

关键词: 信息光学;菲涅耳衍射;数字水印;版权保护

中图分类号: O438; TP309.7 文献标识码: A

Blind Digital Watermarking Technique Based on Optical Fresnel Diffraction

Huang Qinglong¹ Liu Jianlan²

(¹ School of Science, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310037
² Institute of Electronic Information Institute, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310037)

Abstract: A new blind digital watermarking algorithm based on optical Fresnel diffraction is proposed. The watermarking image is transformed into a complex matrix after discrete Fresnel diffraction. The complex matrix is separated into real and imaginary parts, which are embedded into the host image for different positions, respectively. The blind watermark is obtained by replacing the value of the embedded pixel of the original host image with the average of adjacent pixels. Numerical calculation shows that the algorithm is robust to the attack of the pixel modifications, such as brightness, contrast and gray curve, and has the resistance to the JPEG lossy compressing, cropping and superposing noise. It's also robust to the resampling attack and can be drawn from the image by the screen copy. Because the watermark can be embedded in the image flexibly, the double keys are designed in the large degrees of freedom, and the watermark can be retrieved from the published image without the original image, the algorithm has high security and practical value.

Key words: information optics; Fresnel diffraction; digital watermark; copyright protection

1 引 言

数字水印作为数字媒体(图像、视频、音频)版权的有力保护手段,已成为目前信息安全领域研究的热点,其成果已在网络数字产品、电子商务、银行、出版印刷等领域得到大量应用^[1]。利用计算光学的方法来实现图像的水印版权保护,有不少作者研究^[2~9],如文献[2]的傅里叶变换全息术水印法,文

献[3]的数字全息三维物体水印法,文献[4]菲涅耳变换水印法,文献[5,6]的虚拟光学三维空间数字水印法等。文献[4~6]的数字水印法,其原理主要是基于光学菲涅耳衍射,但文献[4]的水印提取需要原始图像数据,属“非盲”水印提取;而文献[5,6]的水印,其图像数据是一复矩阵,因而只能对复矩阵进行操作才能从中提取水印,不能从显示或打印的图像

作者简介:黄清龙(1965~),男,杭州电子科技大学理学院副教授,主要从事光电检测技术方面的研究。

E-mail: huangqinglong@yahoo.com.cn

收稿日期:2005-10-18;收到修改稿日期:2005-12-23

中提取水印。本文在上述文献的思想基础上,提出一种新的基于光学菲涅耳衍射法的数字水印计算方法,将经菲涅耳衍射变换后的水印图像数据的实部和虚部分开,然后将两者分别嵌入受保护的图像中,因而该图像数据是实数,便于传输、显示和打印,可望获得显示水平级的水印嵌入和提取,从而使水印的使用更方便、更具实用价值。

2 理论模型和计算方法

图 1 为非涅耳衍射计算用图。设 W_0 为 $(N \times N)$ 数字水印图像,位于平面 P_0 处,由波长为 λ 的单体平行光照射;由光学菲涅耳衍射知,在平面 P_1 观测到的离散菲涅耳衍射图^[4~7,10] $W_1(N \times N)$ 如(1)式所示。这里忽略了一些无关紧要的系数和因子,式中 Δ_0 和 Δ_1 分别是水印图像 W_0 和非涅耳衍射图 W_1 的像素间距。

$$W_1(m, n) = \frac{1}{N} \exp \left[i \frac{\pi \Delta_1^2}{\lambda z_1} (m^2 + n^2) \right] \times \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N W_0(k, l) \times \exp \left[i \frac{\pi \Delta_0^2}{\lambda z_1} (k^2 + l^2) \right] \times \exp \left[-i \frac{2\pi}{N} (k \cdot m + l \cdot n) \right], \quad (1)$$

由于(1)式包含因子 $\exp \left[-i \frac{2\pi}{N} (k \cdot m + l \cdot n) \right]$, 它实际上是二维离散傅里叶变换核因子,因此(1)式是水印图像 $W_0(k, l)$ 经二次相位因子 $\exp \left[i \frac{\pi \Delta_0^2}{\lambda z_1} (k^2 + l^2) \right]$ 的移相作用后的二维离散傅里叶变换。如果

$$\frac{\pi \Delta_0^2}{\lambda z_1} \ll \frac{2\pi}{N}, \quad (2)$$

则二次相位因子不起作用,菲涅耳变换退为傅里叶变换,因此对 W_1 作逆傅里叶变换就能得到 W_0 。要避免这种情况发生,应合理选择因子使

$$\frac{\pi \Delta_0^2}{\lambda z_1} > \frac{2\pi}{N}, \quad (3)$$

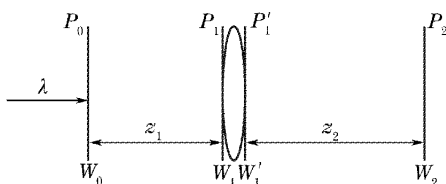


图 1 菲涅耳衍射示意图

Fig. 1 Schematic diagram for Fresnel diffraction

选择的依据就是对 W_1 作逆傅里叶变换得不到 W_0 。从数值计算的角度上看,选取 z_1 除满足(3)式外,应该是越小越好,这为 z_1 的选择提供了极大便利。

由(1)式计算可知矩阵 W_1 为一复矩阵,而大多数显示和打印的软件和设备,只作用于实数,虚数往往丢弃,为尽可能地保留复矩阵 W_1 的信息,可采取以下做法:

假设需要进行版权保护的宿主图像为 I_0 , 它是 $(N_0 \times N_0)$ 的数字矩阵(一般有 $N_0 > 2N$)。将 W_1 的实部 WR_1 和虚部 WI_1 采取隔行隔列的方式嵌入到图像 I_0 的不同位置处,嵌入时应保证两者不要重叠也不要溢出图像 I_0 。具体做法是按照下列(4)式将 W_1 的实部 WR_1 和虚部 WI_1 扩充为 $(N_0 \times N_0)$ 的大矩阵 WR_2 和 WI_2 , 即有

$$\begin{aligned} WR_2(2m, 2n) &= WR_1(m, n), \\ 1 &\leq m, n \leq N, \\ WI_2(2m, N_0 + 1 - 2n) &= WI_1(m, n), \\ 1 &\leq m, n \leq N, \end{aligned}$$

其他

$$\begin{aligned} WR_2(m', n') &= WI_2(m', n') = 0, \\ 1 &\leq m', n' \leq N_0. \end{aligned} \quad (4)$$

此外,一旦确定水印数据嵌入的位置,再将原始图像 I_0 在该位置处的像素值改为其相邻像点的像素值的平均值,这样做对其影响很小,于是原始宿主图像 I_0 就变换为 I'_0 。本例是在 I_0 的 $(2m, 2n)$ 像素处嵌入实部 $WR_1(m, n)$ 的值,因此对 I_0 的修改按照(5)式进行,

$$\begin{aligned} I'_0(2m, 2n) &= [I_0(2m - 1, 2n - 1) + \\ &I_0(2m - 1, 2n) + I_0(2m - 1, 2n + 1) + \\ &I_0(2m, 2n - 1) + I_0(2m, 2n + 1) + \\ &I_0(2m + 1, 2n - 1) + I_0(2m + 1, 2n) + \\ &I_0(2m + 1, 2n + 1)]/8, \end{aligned} \quad (5)$$

同样地对虚部 $WI_1(m, n)$ 在 I_0 嵌入点 $(2m, N_0 + 1 - 2n)$ 的像素值仿照(5)式进行替代修改,而 I_0 的其他像素值保持不变。然后将 I'_0 、 WR_2 和 WI_2 三者取权相加得到合成后的图像 I_1 , 即有(6)式:

$$I_1 = I'_0 + w \cdot (WR_2 + WI_2), \quad (6)$$

式中 w 相当于水印信号的调制系数, w 的取值,原则上是不影响所保护的图像 I_0 的视觉效果,即水印信息是“不可见”的。从(6)式可看到,除了嵌入了水印的像素的值被修改外,原图 I_0 其它像素的值保持原样,同时该像素的本底值等于其邻近八个像素的均值。

现可将载有水印标志信息的目标图像 I_1 发布出去。作为图像 I_0 的拥有者,他知道水印嵌入的方

式和位置以及计算式(1)中的 λ 和 z_1 ,将它们一起作为密钥保密起来。

如拥有者想从发表出版的目标图像 I_1 中提取水印以维护版权,那么他能够根据(6)式从 I_1 中恢复 WR_1 和 WI_1 ,如(7)式所示:

$$\begin{aligned} WR_1(m, n) = [I_1(2m, 2n) - I'_0(2m, 2n)]/\omega = \\ \{I_1(2m, 2n) - [I_1(2m - 1, 2n - 1) + \\ I_1(2m - 1, 2n) + I_1(2m - 1, 2n + 1) + \\ I_1(2m, 2n - 1) + I_1(2m, 2n + 1) + \\ I_1(2m + 1, 2n - 1) + I_1(2m + 1, 2n) + \\ I_1(2m + 1, 2n + 1)]/8\}/\omega, \end{aligned} \quad (7)$$

对 $WI_1(m, n)$ 的提取可仿照(7)式进行。

从以上可看出,由于 I_1 已含有嵌入水印信息的像素的原值(即相邻的像素的均值),因此恢复 W_1 的过程只涉及公开发表的图像 I_1 ,不需要原始图像

I_0 ,从而实现所谓“盲水印”提取。由此获得复矩阵:

$$W_1 = WR_1 + i \cdot WI_1. \quad (8)$$

若对 W_1 进行菲涅耳衍射求逆运算,即可从 I_1 中提取水印图像 W_0 。其相应的光学上的做法如下:采用焦距为 f 的凸透镜,在距离 z_2 处观测,如果 z_2 满足下式:

$$1/z_1 + 1/z_2 = 1/f, \quad (9)$$

则得到水印图像 W_0 的倒像 W_2 ,光路图如图1所示。

实际上,对应的数值运算是复矩阵 W_1 先经透镜作用变为 W'_1 ,即增加一相位因子,有下式:

$$W'_1(m, n) = W_1(m, n) \exp\left[-i \frac{\pi \Delta_1^2}{\lambda f} (m^2 + n^2)\right], \quad (10)$$

然后,在平面 P_2 处观测,所得图像 W_2 是图像 W'_1 由平面 P'_1 经菲涅耳衍射而来,运算如下:

$$\begin{aligned} W_2(p, q) &= \frac{1}{N} \exp\left[i \frac{\pi \Delta_2^2}{\lambda z_2} (p^2 + q^2)\right] \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N W'_1(m, n) \exp\left[i \frac{\pi \Delta_1^2}{\lambda z_2} (m^2 + n^2)\right] \exp\left[-i \frac{2\pi}{N} (pm + qn)\right] = \\ &= \frac{1}{N} \exp\left[i \frac{\pi \Delta_2^2}{\lambda z_2} (p^2 + q^2)\right] \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N W_1(m, n) \exp\left[i \frac{\pi \Delta_1^2}{\lambda} \left(\frac{1}{z_2} - \frac{1}{f}\right) (m^2 + n^2)\right] \exp\left[-i \frac{2\pi}{N} (pm + qn)\right] = \\ &= \frac{1}{NN} \exp\left[i \frac{\pi \Delta_2^2}{\lambda z_2} (p^2 + q^2)\right] \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N W_0(k, l) \exp\left[i \frac{\pi \Delta_0^2}{\lambda z_1} (k^2 + l^2)\right] \times \\ &= \exp\left[i \frac{\pi \Delta_2^2}{\lambda} \left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} - \frac{1}{f}\right) (m^2 + n^2)\right] \exp\left\{-i \frac{2\pi}{N} [(p+k)m + (q+l)n]\right\} = \\ &= \exp\left[i \frac{\pi \Delta_2^2}{\lambda z_2} (p^2 + q^2)\right] \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N W_0(k, l) \exp\left[i \frac{\pi \Delta_0^2}{\lambda z_1} (k^2 + l^2)\right] \frac{1}{NN} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \exp\left\{-i \frac{2\pi}{N} [(p+k)m + (q+l)n]\right\} = \\ &= \exp\left[i \frac{\pi \Delta_2^2}{\lambda z_2} (p^2 + q^2)\right] \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N W_0(k, l) \exp\left[i \frac{\pi \Delta_0^2}{\lambda z_1} (k^2 + l^2)\right] \delta(p+k, q+l) = \\ &= \exp\left[i \left(\frac{\pi \Delta_2^2}{\lambda z_2} + \frac{\pi \Delta_0^2}{\lambda z_1}\right) (p^2 + q^2)\right] \cdot W_0(-p, -q), \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $\delta(p+k, q+l)$ 为单位取样函数, Δ_2 为 W_2 的像素间距。由此可看出,经过透镜和菲涅耳衍射的共同作用,求和号中的二次相位因子消失;如取 W_2 的模,则上式中最后一个等式中的相位因子也将消失,于是在平面 P_2 处观察到水印图像 W_0 的倒像。

3 仿真计算结果和讨论

3.1 水印的嵌入和提取

图2(a)为(256×256×8)原始宿主灰度图像 I_0 ,此图需嵌入水印。图2(c)为即将嵌入到图像 I_0 中的原始(64×64×8)灰度水印图像 W_0 。

设置参量:波长 $\lambda=632.8$ nm,物距 $z_1=0.24$ m,计算原始水印图像 W_0 的菲涅耳衍射,得到其菲涅耳

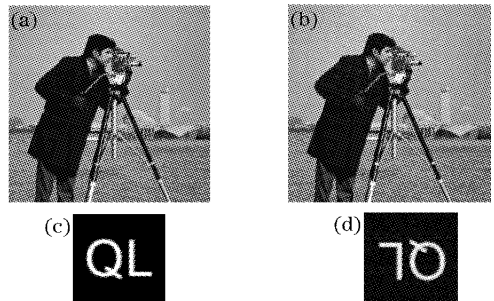


图2 (a)原始宿主图,(b)已嵌入水印的目标,
(c)原始水印图,(d)从(b)中提取的水印

Fig. 2 (a) Original image, (b) watermarked image,

(c) original watermark, (d) retrieved watermark from (b)
衍射变换 W_1 ,其实部和虚部分别如图3(a)和图3(b)

所示;需要说明的是:图 3(c)和图 3(d)为 W_1 的逆傅里叶变换,从图 3(c)中看不到水印标志“QL”,由此亦可看出本例参量选择的合理性以及菲涅耳衍射变换与傅里叶变换的不同,但是图 3(d)图的 $z_1 = 24$ m,已明显显示出水印标志“QL”,此时菲涅耳变换已退回到傅里叶变换。

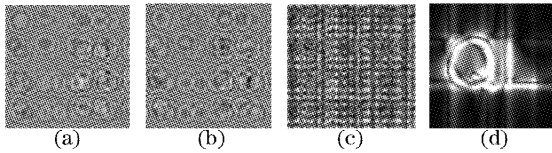


图 3 (a)水印图菲涅耳变换 W_1 的实部及虚部(b), (c) W_1 逆傅里叶变换, (d)当 $z_1 = 24$ m 时的 W_1 逆傅里叶变换
Fig. 3 (a) The real part and (b) imaginary part of watermark image Fresnel transform, (b) inverse Fourier transform of W_1 , (c) inverse Fourier transform of W_1 when its diffraction distance $z_1 = 24$ m

现将 W_1 的实部 WR_1 和虚部 WI_1 , 按照前文要求嵌入到经像素替代处理的图像 I'_0 的不同位置处, 选取 $w = 0.1$, 按(6)式与图像 I'_0 作叠加, 结果如图 2(b)所示, 该目标图 I_1 与原图 I_0 的能量归一化均方误差(NMSE)为 0.0013, 说明嵌入的水印和对原图的部分像素的修改对原图的影响很小。于是可将该包含水印信息的图像 I_1 公开发表出去。

实验表明:当调制因子 $w \leq 0.1$, 则在视觉上分辨不出水印加入后的影响, 即水印是“不可见的”。图 2(d)为从图 2(b)中提取的水印图像, 是原始水印图像 W_0 的倒像, 其中参量设置为: 透镜焦距 $f = 0.10$ m, 像距 z_2 满足(9)式。

3.2 水印算法的鲁棒性实验

3.2.1 抗亮度、对比度、灰度曲线调整攻击的能力

图 4(a)所示为将包含水印信息的图像 I_1 的亮

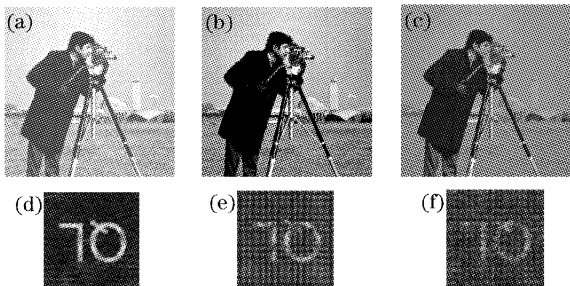


图 4 (a)亮度增加 60%及从中提取的水印(d); (b)对比度增加 30%及其水印(e); (c)调整灰度曲线及其水印(f)
Fig. 4 Increasing brightness 60% (a) and the retrieved watermark (d), the increasing contrast 30% (b) and the retrieved watermark (e); modified image by gray curve (c) and retrieved watermark (f)

度提高 60%后的情形, 及从中提取出的水印(d)。图 4(b)所示为将图像 I_1 的对比度提高 30%后的情形, 及从中提取的水印(e)。图 4(c)所示为将图像 I_1 的灰度曲线调整后, 及从中提取的水印(f)。

3.2.2 抗 JPEG 有损压缩、剪切、噪声污染攻击的能力

将包含水印的图像 I_1 进行 JPEG 压缩, 如图 5(a)所示, 压缩比为 2 比 1, 图 5(d)为从中提取的水印。将包含水印的图像 I_1 进行剪切, 如图 5(b)所示, 图 5(e)为从中提取的水印。图 5(c)为将图像 I_1 叠加随机分布的高斯型噪声后的情形, 峰值信噪比(PSNR)为 22.95, 此时图像质量已经很差, 但仍可从中提取水印, 如图 5(f)所示。

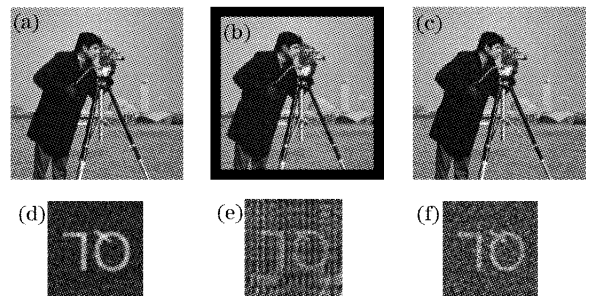


图 5 (a)压缩比 2:1 及其水印(d); (b)图像剪切及水印(e); (c)叠加噪声及水印(f)

Fig. 5 Compressing ratio 2:1 (a) and the retrieved watermark (d). Cropped watermarked image (b) and the retrieved watermark (e). Noised watermarked image (c) and the retrieved watermark (f)

3.2.3 抗图像重采样攻击的能力

图 6(a)和(b)为采用计算机屏幕(参量: 显示分辨率 96 ppi、色彩 32 色)硬拷贝(Print screen)获得的图像及从中提取的水印。

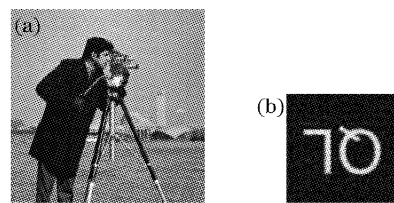


图 6 (a)屏幕硬拷贝图像及其水印(b)

Fig. 6 Screen copy image (a), and the retrieved watermark (b)

3.3 水印质量和水印算法的安全性讨论

导致提取水印质量下降的主要原因是水印数据被破坏或篡改, 因此任何对目标图像 I_1 的修改都会使提取水印质量下降甚至失败。其次, 由于本文将水印图像的菲涅耳变换 W_1 的实部和虚部分开再嵌入

到原图 I_0 的不同位置处,因此当遇到攻击时, W_1 的实部和虚部不会同步调地发生变化,从而使提取水印质量下降,这在图像遭受对比度、灰度曲线调整和叠加噪声攻击时尤为明显,但是对图像亮度的攻击有很强的鲁棒性(I_1 的亮度在提高 80%到降低 50% 的范围内,仍能正确提取水印);再者,由于水印嵌入的强度不易过大(本文 $w=0.1$),在运算过程中必然有信息的损失和丢失,从而使得提取的水印质量下降,这在图像遭受 JPEG 有损压缩、剪切时很明显。

要想从 I_1 中恢复 W_1 ,若不知道嵌入的方式和嵌入的位置,将是困难的。另外,对 W_1 作逆菲涅耳衍射变换,必须知道物距 z_1 和入射光的波长 λ 。计算表明:要获得清晰的水印像, z_1 和 λ 的偏移量不得超过 5%。综合起来:由于恢复 W_1 存在困难以及密钥 z_1 和 λ 的选择存在极大的随意性,当有恶意攻击时,要想从 I_1 中提取水印是非常困难的,因此该算法是安全的。

4 结 论

计算结果表明:该水印算法具有很强的鲁棒性,能抵抗诸多图像像素变换的攻击,如图像最常见的变换:亮度、对比度、灰度曲线调整等;还能抵抗 JPEG 有损压缩、剪切、噪声污染等攻击;该法不仅能从图像的数据矩阵中提取水印,而且还能直接从显示屏幕上拷贝的图像中提取水印,从而获得显示水平级的水印提取法;由于该方法为使用者提供灵活的水印嵌入方式、双重密钥的灵活选取,因而使该方法具有很高的安全性;由于提取水印信息不需要原始的图像数据,因此该方法属“盲水印”提取;该算法简单,计算量不大。以上这些特点可为该水印计

算法走向实际应用提供技术保证。

参 考 文 献

- 1 S. Katzenbeisser, F. A. P. Petitcolas. *Information Hiding Techniques for Steganography and Digital Watermarking* [M]. Norwood, MA, USA. Artech House, Inc., 2000. Chap. 5
- 2 Takai N, Mifune Y. Digital watermarking by a holographic technique[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(5): 865~873
- 3 Kishk S, Javidi B. Watermarking of three-dimensional object by digital holography[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(3): 167~169
- 4 H. Seto, Y. Aoki, Seok Kang. An image data watermarking technique using the average of a Fresnel-transformed pattern[J]. *Image Processing, 2001. Proceedings. 2001 International Conference on.*, 2(7~10): 534~537
- 5 Xiang Peng, Lingfeng Yu, Lilong Cai. Digital watermarking in three-dimensional space with a virtual-optics imaging modality [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **226**:155~165
- 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 (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
- 7 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,牛憨笨. 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
- 8 Yu Bin, Peng Xiang. Optical image encryption based on cascaded phase retrieval algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 881~884 (in Chinese)
于斌,彭翔. 基于级联相位恢复算法的光学图像加密[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 881~884
- 9 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 (in Chinese)
陈林森,周小红,邵洁. 一种基于二元位相加的大信息量数字全息水印[J]. *光子学报*, 2005, **34**(4): 616~620
- 10 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