

# 数字全息再现像散斑噪声消除的研究

蔡晓鸥 倪小静

(浙江树人大学基础部, 浙江 杭州 310015)

**摘要** 随着数字全息术的应用日渐广泛,如何得到高质量的再现像质已成了数字全息研究和应用中非常重要的问题。由于散斑噪声的统计特性较差,因而散斑噪声被认为是相干成像中最难解决的问题之一。在研究数字全息术再现像散斑形成原因的基础上,利用激光散斑的统计特性,提出了降低再现像散斑的方法。先提取全息图再现像频谱中能量相对较小的频谱作为近似散斑频谱,并在该频谱段内进行数据随机替换,获取带有不同独立散斑的再现像,在进行独立再现像散斑迭代叠加的同时逐步减少散斑能量,从而大幅减小散斑噪声,提高了再现像的像质。理论与实验均证明了其有效性,为数字全息图散斑噪声的消除提供了一种崭新的思路与方法。

**关键词** 数字全息;散斑噪声;再现像;迭代叠加

**中图分类号** O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.050901

## Study on Reduction of Speckle Noise in Reconstructed Image of Digital Hologram

Cai Xiaou Ni Xiaojing

(Department of Basic Sciences, Zhejiang Shuren University, Hangzhou, Zhejiang 310015, China)

**Abstract** With the increasing application of digital hologram, how to acquire high quality of reconstructed image of digital hologram has been a very important research topic. Speckle noise has been one of the most difficult problems in the coherent imaging system because of its poor statistical regularity. Based on the statistical characteristics and the formation cause of speckle noise in the reconstructed image of digital hologram, the way to reduce speckle noise is put forward. The frequency spectrum of reconstruction with lower energy is extracted from the reconstructed image of hologram and considered as approximate frequency spectrum of speckle noises. Then it is replaced with random data and the reconstructed image with different independent speckle noise is obtained. Lastly speckle energy is gradually reduced when the independent reproduced speckle noises are iteratively superimposed. As a result, the speckle noise can be reduced greatly and the quality of reconstructed image can be improved. The validity of this method is proved in theory and experiment. It offers a entirely new thinking and practical way to reduce the speckle noise in the reconstructed image of digital hologram.

**Key words** digital holography; speckle noise; reconstructed image; iterative superimposition

**OCIS codes** 090.1995; 090.2870; 090.1760

## 1 引言

近年来,由于计算机技术及外围设备的进步,数字全息术的研究应用得以全面展开<sup>[1,2]</sup>。研究工作涉及的范围也非常广泛,涵盖了面形测量、变形测量和振动测量等一系列领域,取得了较大的进展。在数字全息术的实际应用中,再现像的像质是一个关键问题,直接影响测量的准确度。因此,如何获得高质量的再现像质已成了数字全息研究和应用中非常重要的问题。Schnars等<sup>[3]</sup>提出了用CCD元件作为全息图的记录材料得到数字全息图,并用计算机获取物光波波前的方法,但这仅仅是激光全息图的数字化,不可避免的相干噪声严重地影响了再现像质。特别是散斑噪声,它的存在使图像像素强度(灰度)剧烈变化,即在一片均匀的目标表面上,有的分辨率单元呈亮点,有的呈暗点,降低了图像的灰阶和空间分辨率,隐藏了图像的精细

**收稿日期**: 2013-01-29; **收到修改稿日期**: 2013-02-25; **网络出版日期**: 2013-04-12

**基金项目**: 浙江省自然科学基金(Y1100099)资助课题。

**作者简介**: 蔡晓鸥(1972—),女,硕士,教授,主要从事全息信息处理方面的研究。E-mail: cai.xo@163.com

结构,使图像的解析性明显变差,降低了图像质量。同时,由于散斑噪声的统计特性较差,因而被认为是相干成像装置中最难解决的问题之一。目前国内外已有不少的学者对数字全息图的像质改善问题进行了研究,提出了一些可行的方法<sup>[4~6]</sup>。对全息图进行分割并进行分割子图再现叠加<sup>[7]</sup>,可以达到降低激光散斑的效果,但是大大地降低了再现像的分辨率,牺牲了再现像的质量;利用孔径反卷积方法可降低由于孔径衍射带来的散斑加重<sup>[8]</sup>,但对于散斑的消除并未涉及;利用对再现像进行小波滤波<sup>[9]</sup>、离散傅里叶滤波<sup>[10]</sup>等方法能降低激光散斑噪声,但是这一过程仅仅是应用数字图像处理技术,而脱离了全息图本身的特性及散斑的统计特性,因而处理效果不是很理想。本文在研究数字全息术再现像散斑的形成原因的基础上,利用激光散斑的统计特性,提出获取带有不同独立散斑的再现像的方法,在进行独立再现像散斑迭代叠加的同时逐步减少散斑能量,从而大幅减小散斑噪声,提高了再现像的像质。理论分析和实验证明该方法简单、有效。

## 2 数字全息术激光散斑的形成原因及特点

全息记录是利用干涉原理,将物体发出的特定光波以干涉条纹的形式记录物光波前的全部信息。以  $R(x, y)$  表示参考光,  $O(x, y)$  表示物光,  $C(x, y)$  表示再现光,数字全息记录与再现光路示意如图 1 所示, CCD 记录的总光强为

$$I_H(x, y) = |O(x, y) + R(x, y)|^2 = OO^* + RR^* + OR^* + O^*R. \quad (1)$$

全息图透射率

$$\tau \propto |O(x, y) + R(x, y)|^2 = OO^* + RR^* + OR^* + O^*R. \quad (2)$$

利用全息衍射再现的原理,用计算机模拟再现数字全息图。若用参考光的共轭光作为再现光  $C(x, y)$ ,则全息图再现出射光为

$$U_c(x, y) = C(x, y)I(x, y) = COO^* + CRR^* + COR^* + CO^*R. \quad (3)$$

全息记录以相干光作为照明光源,波场具有很高的空间相干性,当这种光波在物表面进行反射或透射时,不同物体表面将发生不同的散射。事实上,以光波的尺度来衡量,我们遇到的多数材料都是粗糙的,一个粗糙散射面上的多种多样的微小面积对观察到的总场提供了随机相位的基元,这些基元互相干涉产生了最后的强度,强度的强弱取决于可能出现的一组随机相位。所以,可以讨论这样一个物体的透射率

$$t(r) = f(r)n(r), \quad (4)$$

式中  $f(r)$  是一个确定函数,它代表理想物信号,  $n(r)$  为典型随机相位。也就是说,把一块物板等效成两块板的重置,一块板的复透射率为  $f(r)$ ,另一块板是一个随机相位屏  $n(r)$ ,如图 2 所示。

由此,设物体表面复振幅反射率为  $f(x_o, y_o, z_o)$ ,则物体表面光的复振幅分布为

$$O(x, y) = \sum_n f(x_{on}, y_{on}, z_{on})n(x_{on}, y_{on}, z_{on}) \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} n(x_{on}, y_{on}, z_{on})\right], \quad (5)$$

式中  $n(x_{on}, y_{on}, z_{on})$  是由于表面的粗糙而产生的反射率的随机变化,  $\frac{2\pi}{\lambda} n(x_{on}, y_{on}, z_{on})$  是由于表面的凹凸而产生的随机相位差。

由全息图的出射光表达式(3)式可以看出,(3)式中的第三项  $COR^*$  将在原物体位置形成物体的实像:

$$\varphi(x, y) = A' \sum_n f(x_{on}, y_{on}, z_{on})n'(x_{on}, y_{on}, z_{on}) \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda} n'(x_{on}, y_{on}, z_{on})\right], \quad (6)$$

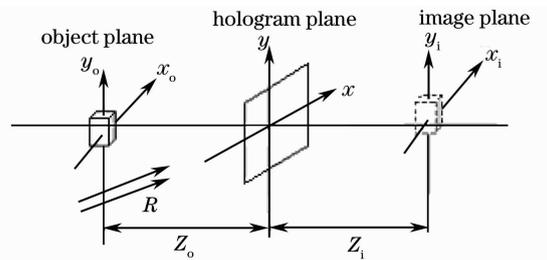


图 1 数字全息图的制作及再现光路示意图

Fig.1 Schematic for recording and reconstruction of a digital hologram

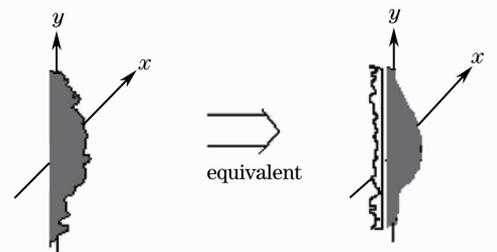


图 2  $t(r) = f(r)n(r)$  的示意图

Fig.2 Schematic for  $t(r) = f(r)n(r)$

式中  $n'(x_{on}, y_{on}, z_{on})$  及  $\frac{2\pi}{\lambda}n'(x_{on}, y_{on}, z_{on})$  是连同全息图再现过程中再次引入的反射率及相位的随机变化考虑在内的反射率及相位的随机变化。

由此实像的强度为

$$I = \varphi(x, y)\varphi^*(x, y) = A'^2 \sum_n |f(x_{on}, y_{on}, z_{on})|^2 |n'(x_{on}, y_{on}, z_{on})|^2 = \beta I_0 I_n, \quad (7)$$

式中  $I_0$  表示理想的物光的强度,  $I_n$  表示激光散斑的强度。

从以上分析可以看出,对于全息再现像散斑的形成可以分为以下几个过程:1) 在激光照明下,由于照明光的高度相干性和物面相对光波(微波或声波)的粗糙性,使其在适中距离的任一观察点处得到的散射回波是由许多来自表面不同的微观区的相干组元或子波组成的,它们可能产生相长或相消,形成带有散斑噪声的物光波;2) 带有散斑的物光波与参考光进行干涉,形成散斑全息图;3) 再现时,散斑被全息条纹的衍射调制到各个衍射级次(再现像)上,从而形成再现像的散斑噪声。再现像被激光散斑调制,变得模糊不清,被散斑覆盖的再现像细节很难分辨清楚。

### 3 全息激光散斑的消除

根据散斑的统计特性,若能获得多张带有不同独立散斑的再现像,并对再现像的强度进行叠加,即

$$I = \beta I_0 (I_{n1} + I_{n2} + \dots + I_{nM}) = \beta I_0 I'_n, \quad (8)$$

式中  $I_0$  为理想的物光的强度,  $I_{n1}, I_{n2}, \dots, I_{nM}$  表示  $M$  幅再现理想物光所带的随机且互不相关的散斑强度,  $I'_n$  为合成后的总的散斑强度。若  $I_{n1}, I_{n2}, \dots, I_{nM}$  的平均强度均相等,总强度的对比度  $C$  及信噪比  $R_{SN}$  分别是

$$C = \frac{1}{\sqrt{M}}, \quad R_{SN} = \sqrt{M}, \quad (9)$$

总强度的信噪比提高了  $\sqrt{M}$  倍。所以为了减小数字全息再现像散斑噪声,寻找或是制作再现理想物光所带的独立散斑强度分布是问题的关键。另外,统计光学里已经得到,一个完全散斑图样的强度分布服从负指数概率密度函数:

$$p(I) = \begin{cases} \frac{1}{I} \exp\left(-\frac{I}{I}\right), & I \geq 0 \\ 0, & I < 0 \end{cases} \quad (10)$$

即散斑场在强度零点处的概率密度最大,然后随着强度的增大其密度按负指数规律衰减。所以,对于能量一定的图像,散斑噪声的能量相对信号来说比较低。根据 Parseval 定理,信号在坐标空间中的总能量等于它在傅里叶变换空间中的总能量,所以散斑噪声在其频谱域的能量相对信号也是较低的。根据这一散斑频谱分布特点,本文尝试从全息图原始再现像频谱中提取能量相对较小的频谱作为近似散斑频谱,并在该频谱段内进行数据随机给出,得到全新的独立的近似散斑频谱,经傅里叶逆变换得到带有另一个独立散斑分布的再现像。虽然再现像频谱图中能量相对较小的频谱并不一定是散斑频谱,这种近似在一定的程度上降低了再现像质,但从实验结果可以看出,相对于散斑的抑制程度而言,这种损失是可以接受的。由(9)式可知,将若干个带有独立散斑的再现像进行叠加,叠加像将具有更高的信噪比,在一定程度上抑制了散斑噪声。为了更有效地提高信噪比,提高计算效率,采用迭代的方法进行信号叠加,即先对两幅带有独立散斑分布的再现像进行叠加,然后以新得到的叠加像作为基础,提取近似散斑频谱,并依此类推进行再现像叠加。同时,在再现像叠加的过程中逐步减少散斑能量,从而大幅减小散斑噪声。

### 4 实验结果及分析

下面通过数字模拟及对实际全息再现图像的处理来说明对全息再现像散斑抑制的过程及结果。设原物信号为  $y_1 = \sin(0.01x) \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} d(x)\right]$ , 其强度分布如图 3 所示。考虑到物体粗糙表面在相干光的照射下形成包含散斑噪声的信号,则将其表示为  $y_2 = \sin(0.01x) r_1(x) \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} d(x)\right] \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} r_2(x)\right]$ ,  $r_1(x)$  为由于

表面的粗糙而产生的反射率的随机变化,  $\exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda}r_2(x)\right]$ 表示由于表面的凹凸而产生的随机相位差,其强度分布如图4所示。图5是独立散斑信号迭代结果图,其中图5(a)是对带有散斑的信号进行两次独立散斑叠加的结果,可以明显地看出散斑得到了抑制;图5(b)和(c)分别是对带有散斑的信号进行5次、10次独立散斑信号迭代的结果,随着迭代次数的增加,散斑抑制的效果非常明显。

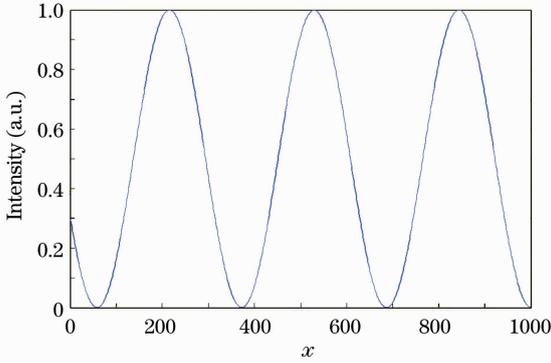


图3 原物信号强度分布

Fig. 3 Intensity distribution of original object's signal

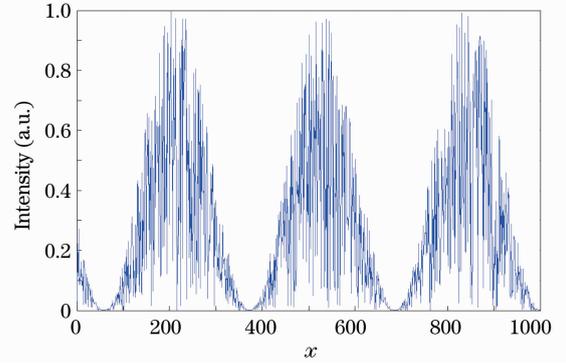


图4 带散斑的信号强度分布

Fig. 4 Intensity distribution of signal with speckle noises

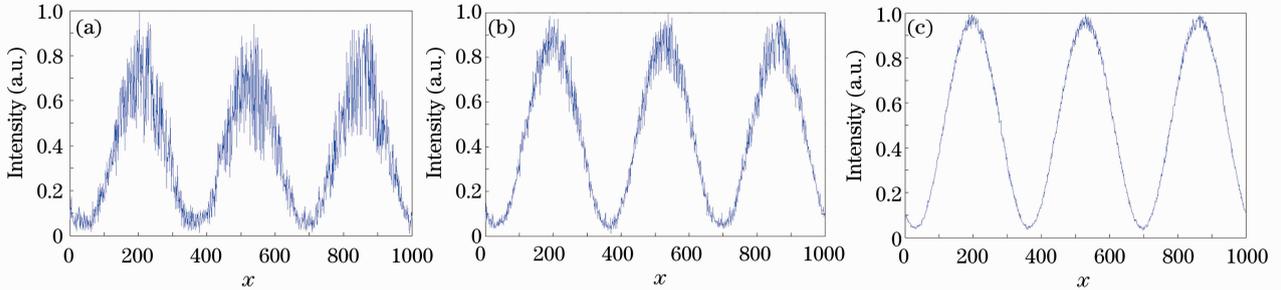
图5 独立散斑信号迭代叠加结果。(a)迭代次数  $M=2$ ; (b) 迭代次数  $M=5$ ; (c) 迭代次数  $M=10$ 

Fig. 5 Iterative superimposition results of signals with independent speckle noises. (a) Iterative number is two; (b) iterative number is five; (c) iterative number is ten

另外,我们制作了一个三维(3D)物体的全息图,如图6(a)所示。记录参数为:CCD孔径大小为  $6.4\text{ mm}\times 4.8\text{ mm}$ ,每个感光单元大小为  $8.6\text{ }\mu\text{m}\times 8.3\text{ }\mu\text{m}$ ,总像素数为  $744\text{ pixel}\times 578\text{ pixel}$ ,物距为  $0.700\text{ m}$ 。进行计算机模拟再现,得再现像如图6(b)所示。从图6(b)中可以看出再现像带有很强的散斑噪声。对再现像进行独

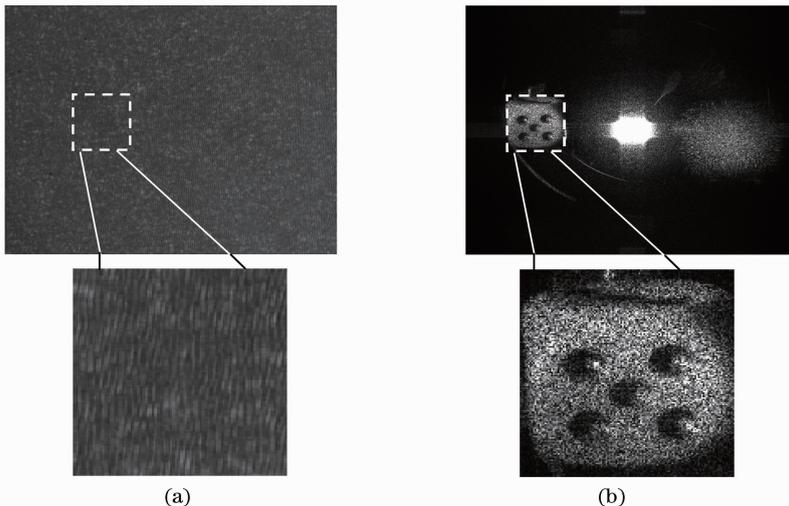


图6 三维物体的全息图及其再现像。(a)全息图;(b)再现像

Fig. 6 Digital hologram of a 3D object and its reconstructed image. (a) Digital hologram; (b) reconstructed image

立散斑迭代,结果如图7所示,其中图7(a)是对带有散斑的信号进行两次独立散斑叠加的结果,图7(b)和(c)分别是对带有散斑的信号进行5次、10次独立散斑信号迭代的结果。可以看出,通过带有独立散斑的再现像的叠加,可以有效地抑制再现像的散斑,而且随着迭代次数的增加,散斑抑制的效果非常明显。

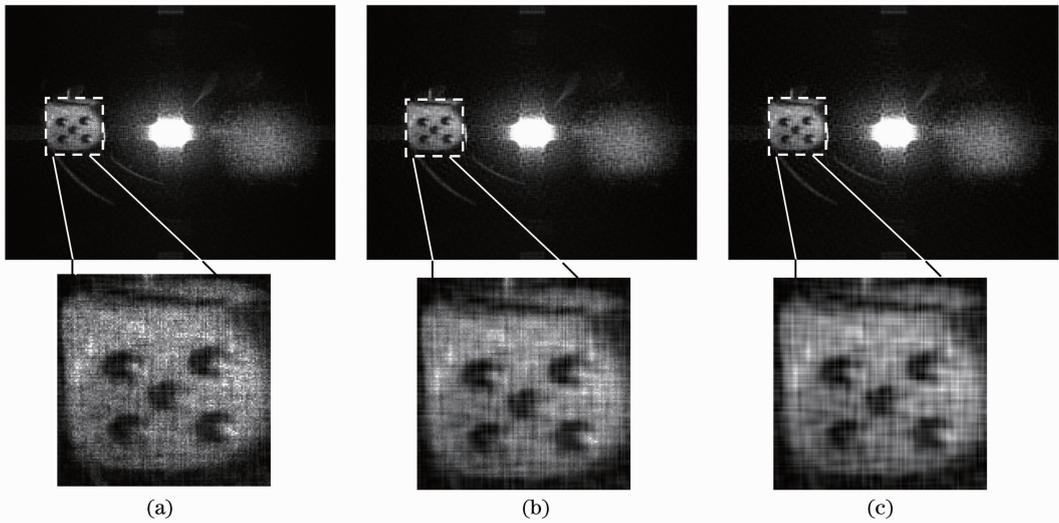


图7 独立散斑再现像的迭代叠加结果。(a)迭代次数  $M=2$ ; (b)迭代次数  $M=5$ ; (c)迭代次数  $M=10$

Fig. 7 Iterative superimposition results of the reconstructed images with independent speckle noises. (a) Iterative number is two; (b) iterative number is five; (c) iterative number is ten

## 5 结 论

随着计算机技术的发展和高分辨率 CCD 元件的出现,数字全息技术得到了很大的发展,其应用领域涉及形变测量、振动分析和形貌测量等。在数字全息术的实际应用中,再现像的像质是一个关键问题,直接影响测量的准确度。特别是对于散斑噪声,由于它的统计特性较差,因而被认为是相干成像装置中最难解决的问题之一。本文首先研究了数字全息术再现像激光散斑的形成原因及特点,基于激光散斑统计特性,利用散斑噪声在其频谱域的能量相对较低这一特性,从全息图原始再现像频谱中提取能量相对较小的频谱作为近似散斑频谱,并在该频谱段内进行数据随机给出,得到全新的独立的近似散斑频谱,从而得到带有另一个独立散斑分布的再现像,采用迭代的方法进行再现像叠加,并且在迭代的同时逐步减少散斑能量,大幅减小了散斑噪声,提高了再现像的像质。理论与实验均证明了其有效性。

## 参 考 文 献

- Pan Weiqing, Zhu Yongjian. Reconstructing method of digital holograms on arbitrarily tilted planes based on angular spectrum interpolation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(8): 0809002  
潘卫清, 朱勇建. 基于角谱插值的数字全息在任意斜面的重建方法[J]. *中国激光*, 2012, **39**(8): 0809002
- Wan Yuhong, Tao Shiquan. Micro-holographic data storage technology and its research progress [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(10): 100004  
万玉红, 陶世荃. 微全息存储技术及其研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(10): 100004
- U. Schnars, W. Jueptner. *Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques*[M]. Berlin: Springer, 2005. 41~69
- Wang Cunshuai, Zhang Yinke, Hao Jinbo *et al.*. Improving reconstruction image quality of digital holography using median filter and intensity subtraction[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(12): 120901  
王存帅, 张引科, 郝劲波 等. 用中值滤波和光强相减法改善数字全息再现像质量[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(12): 120901
- Li Qi, Ding Shenghui, Li Yunda *et al.*. Comparison between 2.52 THz off-axis digital holography and focal-plane imaging [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(9): 0909003  
李琦, 丁胜晖, 李运达 等. 2.52 THz 离轴数字全息成像和焦平面成像特性比较[J]. *中国激光*, 2012, **39**(9): 0909003

- 6 ChenFeihu, Tang Zhilie, Chen Ping *et al.*. Imaging phase objects by digital holography with Stokes parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): 0709001  
陈飞虎, 唐志列, 陈萍等. Stokes参量数字全息法实现相位物体成像[J]. *光学学报*, 2012, **32**(7): 0709001
- 7 M. Abolhassani, Y. Rostami. Speckle noise reduction by division and digital processing of a hologram [J]. *Optik*, 2012, **123**(10): 937~939
- 8 X. O. Cai, H. Wang. The influence of hologram aperture on speckle noise in the reconstructed image of digital holography and its reduction [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(2): 232~237
- 9 A. Sharma, G. Sheoran, Z. A. Jaffery *et al.*. Improvement of signal-to-noise ratio in digital holography using wavelet transform [J]. *Opt. & Lasers Engng.*, 2008, **46**(1): 42~47
- 10 J. Maycock, B. M. Hennelly, J. B. McDonald *et al.*. Reduction of speckle in digital holography by discrete Fourier filtering [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, **24**(6): 1617~1622