

文章编号: 0258-7025(2008)10-1542-06

Tukey 窗切趾全息图用于粒子场在焦位置测量的实验研究

张延曹¹ 赵建林¹ 范琦¹ 张伟²

(¹ 西北工业大学理学院光信息科学与技术研究所, 陕西省光信息技术重点实验室 陕西 西安 710072)
² 空军工程大学理学院, 陕西 西安 710051)

摘要 提出采用能量透射率较大、频谱旁瓣峰值和旁瓣衰减斜率较小的 Tukey 窗对粒子场数字全息图进行切趾处理。分析了在焦位置测量和 Tukey 窗切趾粒子场数字全息图的原理。实验记录了附着于玻璃板表面的微小单层粒子场的数字全息图, 采用 Tukey 窗对其切趾后进行数值再现。实验结果表明, 全息图切趾后的再现像中已不存在黑白相间的干涉条纹, 衬比度增强, 再现粒子像更清晰, 处于边缘区域的再现粒子像几乎被切趾孔径所淹没; 随着窗函数切趾参量的逐渐增大, 可更准确地确定单层粒子场的在焦位置, 提高粒子场在焦位置的测量精度。

关键词 数字全息术; 切趾; Tukey 窗函数; 粒子场分析

中图分类号 TN 247; O 438; TB 877 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083510.1542

Application of Digital Hologram Apodization Using Tukey-Window for Particle In-Focus Position Measurement

Zhang Yancao¹ Zhao Jianlin¹ Fan Qi¹ Zhang Wei²

(¹ Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, Institute of Optical Information and Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China
² School of Science, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710051, China)

Abstract A apodization method with Tukey-window function for digital hologram of particle-field was presented, whose energy transmission is relatively high and the sidelobe peak is relatively low as well as the sidelobe roll-off rate. The principles of in-focus position measurement and digital hologram apodization using Tukey-window for particle were analyzed. The digital holograms of little monolayer particle-field attached on glass surface were recorded, and the apodized holograms adopting Tukey window were reconstructed. The experimental results show that the reconstructed images after digital holograms apodization do not have black-and-white interference fringe, increase contrast and have more clear particle image. The reconstructed particle image located in the fringe field is nearly submerged by the apodized aperture. With increasing the apodization parameter of the window function, the more accurate position of the particles in-focus can be gained, and the measurement precision of particle in-focus position is improved.

Key words digital holography; apodization; Tukey-window function; particle-field analysis

1 引 言

目前, 在许多粒子场^[1,2]应用领域需测量粒子的空间位置分布、平均尺寸大小、速度分布以及粒子

群在运动中的变化(如破碎、凝聚、燃烧)等, 其中对再现粒子像的在焦位置测量是测量其他参数的基础。在传统的粒子场全息术中, 通常记录粒子场的

收稿日期: 2008-02-02; 收到修改稿日期: 2008-03-17

基金项目: 航空科学基金(2006ZD53042)资助课题。

作者简介: 张延曹(1965—), 男, 陕西人, 博士研究生, 主要从事数字全息技术方面的研究。

E-mail: zhangyancao@126.com

导师简介: 赵建林(1958—), 男, 陕西人, 教授, 博士生导师, 主要从事光信息技术及应用方面的研究。

E-mail: jlzhao@nwpu.edu.cn

远场全息图,其振幅透射率是啁啾函数,可利用啁啾函数的频率与记录距离成正比例的关系来确定粒子的位置信息^[3]。B. A. Weiss 等^[4]提出通过计算再现粒子像的边缘灰度梯度来区分在焦粒子和离焦粒子。S. Murata 等^[5]提出依据再现粒子像中央区域的平均光强在轴向的变化趋势来确定粒子的在焦位置。

随着数字图像处理技术的进步和高分辨率 CCD 的出现,使粒子场全息图的数字记录和再现成为可能。粒子场数字全息术不仅克服了传统粒子场全息术的缺点,大大降低了对记录和再现粒子场的硬件要求,而且可得到三维粒子场在任一时刻的振幅和相位信息^[6~9]。但是,受现有 CCD 靶面形状和尺寸的限制,通常采集到的总是非同步采样的有限矩形孔径的数字全息图,导致再现过程中发生孔径衍射和频谱泄漏效应,使再现像中出现黑白相间的干涉条纹,而且越接近边界越明显,从而使再现粒子像变模糊,甚至会淹没靠近边界而尺寸相对较小的粒子,这将不利于对再现粒子像的在焦位置测量。为消除此不利影响,可借助于数字图像处理技术,使数字全息图与适当的窗函数相乘,对全息图加窗切趾后再再现^[10~12],以提高再现像质量。

本文根据文献^[5]提出的确定再现粒子像在焦位置的基本原理,实验记录了附着于玻璃板表面的微小单层粒子场的数字全息图,采用 Tukey 窗对其切趾后进行数值再现,分析全息图加窗切趾处理对粒子场在焦位置测量精度的影响。

2 原理

2.1 在焦位置测量的基本原理

粒子场数字全息术一般采用图 1 所示的同轴全息记录光路。由激光器发出的激光束经扩束准直后照射粒子场,被粒子衍射的光波作为物光波,直接透射光波作为参考光波,在记录距离满足 CCD 采样条件的情况下,得到粒子场的同轴数字全息图。

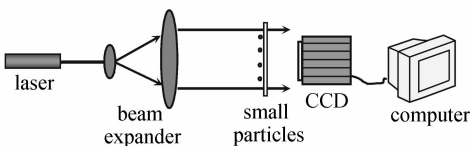


图 1 记录粒子场数字全息图的同轴全息光路

Fig. 1 Experimental setup of in-line holography for recording the digital holograms of particles

对粒子场的分析测量,首先需要由其数值再现像判断粒子的在焦位置,这是对粒子数目、平均尺寸以及平均速度等测量的前提。而在实际的粒子场测

量中,很难得到粒子场到 CCD 记录平面的准确距离,因此需要对一系列不同再现距离下得到的再现像进行分析。只有当再现距离 d' 等于记录距离 d 时,才能得到清晰的在焦再现像。对于亮背景暗粒子,再现像的中心强度最小^[5]。由此可得出再现粒子像的在焦位置测量方法:给定一个轴向再现距离的取值范围,然后取不同再现距离下相应像平面上同一个再现粒子像中心区域的平均强度 \bar{I} 进行比较,当 \bar{I} 最小时所对应的再现距离即为粒子的在焦再现距离,其原理如图 2 所示。

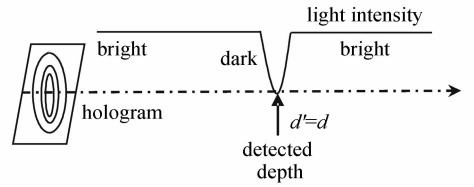


图 2 粒子在焦位置测量示意图

Fig. 2 Sketchmap for measuring the in-focus position of a particle

2.2 Tukey 窗切趾粒子场数字全息图

T. M. Kreis^[13]从频域分析了数字全息成像系统的特性,研究表明数字全息成像系统的点扩展函数受 CCD 的矩形孔径影响,是一个 sinc 函数,使再现像强度分布中出现可观的旁瓣,导致再现过程中发生孔径衍射效应。另外,有限大小的矩形 CCD 窗口对干涉条纹的采样通常是非同步的,即在一个窗长内不能包含整数个条纹周期,这会引发频谱泄漏效应^[14]。空间频谱的泄漏也意味着有衍射发生,会影响再现像的强度和相位分布,使再现波前发生高频起伏。对粒子场全息图,这两种效应会使再现像中出现衍射条纹,导致再现粒子像变模糊,从而不利于其在焦位置的测量。借助于数字图像处理技术,给由 CCD 获得的数字全息图乘以适当的窗函数,即可抑制这两种效应。设数字全息图的灰度分布为 $I_s(m, n)$,用于切趾的窗函数为 $t(m, n)$,则数字切趾后的全息图的灰度分布可表示为^[15]

$$I'_s(m, n) = t(m, n) \times I_s(m, n), \quad (1)$$

即

$$I'_s(m, n) = \sum_{-M/2}^{M/2} \sum_{-N/2}^{N/2} \left[I_H(x, y) \text{rect} \left(\frac{x - m\Delta x}{\Delta p_x}, \frac{y - n\Delta y}{\Delta p_y} \right) \right] \times \delta(x - m\Delta x, y - n\Delta y) t(m, n), \quad (2)$$

式中 $I_H(x, y)$ 为全息图的光强分布; m 和 n 为整数, $-M/2 \leq m \leq M/2$, $-N/2 \leq n \leq N/2$; Δx 和 Δy

分别为 CCD 沿 x 和 y 轴方向上的像素间隔; Δp_x 和 Δp_y 分别为 CCD 单个像素中实际感光区域沿横向和纵向的尺寸。

由(2)式可见,切趾后数字全息图的孔径函数由窗函数 $t(m, n)$ 决定,因而切趾后数字全息成像系统的点扩展函数即是 $t(m, n)$ 的傅里叶变换。只要选择合适的切趾窗函数^[16](旁瓣峰值较低,旁瓣衰减斜率较小),就可在一定程度上抑制甚至消除再现过

程中的频谱泄漏效应,从而提高再现像质量。另外,对于粒子场全息再现像,还需要切趾窗函数具有较大的能量透射率^[16,17]。具有平顶特性的 Tukey 窗函数^[18]不仅具有较大的能量透射率,而且其旁瓣峰值和旁瓣衰减斜率均小于矩形窗函数,因此适合作为对粒子场数字全息图切趾。

为简单起见,只给出边长为 N 的一维 Tukey 窗函数的离散化表达式

$$w(n) = \begin{cases} 0.5 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{r} \frac{n-1}{N-1} - \pi \right) \right] & n < \frac{r}{2}(N-1) \\ 1.0 & \frac{r}{2}(N-1) \leq n \leq (N-1) - \frac{r}{2}(N-1) \\ 0.5 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{r} - \frac{2\pi}{r} \frac{n-1}{N-1} - \pi \right) \right] & n > (N-1) - \frac{r}{2}(N-1) \end{cases} \quad (3)$$

式中 r 为参量,取值范围为 $[0, 1]$,它决定了函数曲线中透射率为 1 部分的宽度。 r 值越大,平顶部分越窄,函数曲线愈接近汉宁窗(Hanning window); r 值越小,平顶部分越宽,函数曲线愈接近矩形窗(Rectangle window)。在 $N = 63, r = 0.5$ 时的一维时域函数曲线及其对应的归一化对数频谱曲线如图 3 所示, ω 为每采样点的弧度。表 1 给出了矩形窗和 Tukey 窗的主要特征参数对比,包括旁瓣峰值 a ,旁

瓣衰减斜率 b 以及能量透射率 T 。其中,旁瓣峰值 a 反映了低频区域频谱泄漏效应的强弱,其值越小,近旁瓣区域的频谱泄漏效应越弱;旁瓣衰减斜率 b 反映了高频区域频谱泄漏效应的强弱,其值越小,远旁瓣区域的频谱泄漏效应越弱;能量透射率 T 主要反映了窗函数对成像系统信息量的影响程度,与窗函数的孔径形状密切相关。

表 1 Tukey 窗和矩形窗的主要参数比较

Table 1 Comparison of the main parameters of the Tukey and the Rectangle window

	a /dB	b / (dB/oct)	T
Tukey window $r = 0.25$	-14	-18	0.84
Tukey window $r = 0.50$	-15	-18	0.69
Tukey window $r = 0.75$	-19	-18	0.53
Rectangle window	-13	-6	1.00

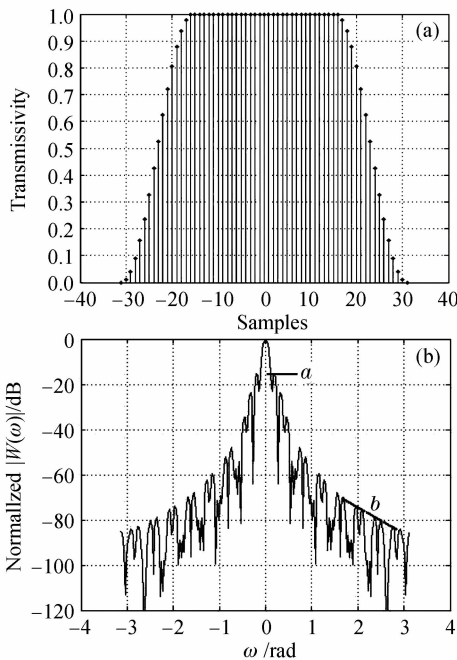


图 3 一维 Tukey 窗的时域图形(a)及其归一化对数频谱曲线(b)

Fig. 3 Transmission profile of one-dimensional Tukey window (a) and its log-magnitude of transform (b)

3 实验及结果分析

实验中采用如图 1 所示的同轴数字全息记录光路,由 He-Ne 激光器发出的波长为 632.8 nm 的细光束经扩束准直后,垂直照射附着于玻璃板表面的微小单层粒子场,由 CCD 记录其同轴数字全息图。所用 CCD 的像素尺寸为 $6.45 \mu\text{m} \times 6.45 \mu\text{m}$,像素数为 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 。

为提高运算效率,实验中的单层粒子场尺寸较小,最终采集到的数字全息图像素数为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$,如图 4(a1)所示。图 4(b1)为采用卷积法^[19]在 $d' = 39.6 \text{ mm}$ 时得到的再现像。可见,受孔径衍射和频谱泄漏效应的影响,粒子场再现像中出现了许多黑白相间的干涉条纹,这些条纹的存在使

得再现粒子像的对比度下降,甚至使尺寸相对较小的粒子被掩盖,因而不利于对粒子的在焦位置测量。采用 Tukey 窗函数对粒子场数字全息图切趾,图 4(a2),(a3)分别为 $r = 0.2, 0.4$ 时的切趾数字全息图,图 4(b2),(b3)分别为 $d' = 39.6$ mm 时相对应的再现像,图 4(c2),(c3)为相应图中方框区域的放大像。

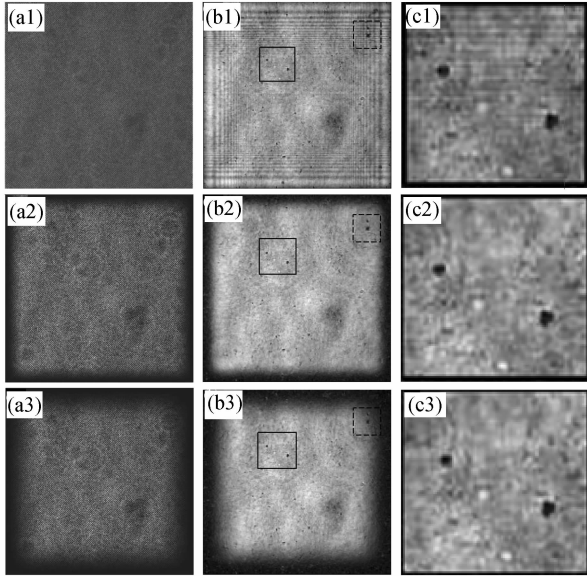


图 4 原始全息图(a1),切趾全息图(a2),(a3)及其数值再现像(b1),(b2),(b3),再现像的局部放大图(c1),(c2),(c3)

Fig. 4 Original hologram (a1) apodized digital holograms (a2), (a3), corresponding reconstructed images (b1), (b2), (b3), partially magnified pictures (c1), (c2), (c3) of the appointed regions respectively. (a1)~(c1) $r = 0$; (a2)~(c2) $r = 0.2$; (a3)~(c3) $r = 0.4$

由图 4(b2),(b3)可见,全息图切趾后的再现像中已不存在黑白相间的干涉条纹,对比度增强,再现粒子像更清晰。另外,处于边缘区域的再现粒子像(由虚线框出)几乎被切趾孔径所淹没。因此,为尽可能地保持再现像的完整性,Tukey 窗函数的参数 r 的取值应小于 0.4。

为获得准确的粒子在焦位置,按照理论分析,取轴向再现距离的变化范围为 39.1~40.5 mm,分别计算图 4 中方形标示区域内两个再现粒子像在不同切趾参数和不同再现距离下对应的中央区域的平均强度 \bar{I}_1 (左上角粒子) 和 \bar{I}_2 (右下角粒子),得到不同切趾参数下,两个粒子中心区域的平均强度随轴向再现距离的变化曲线,结果分别如图 5(a),(b) 所示。

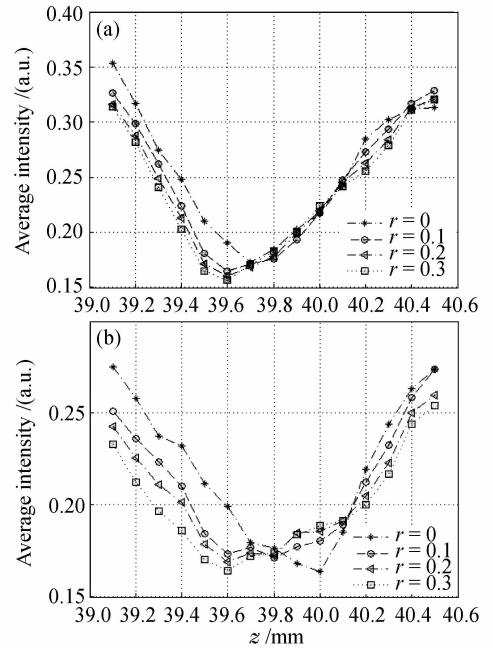


图 5 粒子再现像中央区域的平均强度随轴向再现距离的变化。(a) 左上角粒子;(b) 右下角粒子

Fig. 5 Variations of the central average intensity of the reconstructed image of particle with the reconstructed distance for different apodization parameter values. (a) particle at the top left corner; (b) particle at the lower right corner

对比图 5(a),(b)可见,在 $r = 0$ 时, \bar{I}_1 和 \bar{I}_2 取最小值对应的轴向距离分别为 39.7 mm 和 40.0 mm,即测得的两个再现粒子像的在焦位置之差为 0.3 mm;在 $r = 0.1$ 时, \bar{I}_1 和 \bar{I}_2 取最小值对应的轴向距离分别为 39.6 mm 和 39.8 mm,即此时测得的两个再现粒子像的在焦位置相差 0.2 mm;当 $r = 0.2, 0.3$ 时, \bar{I}_1 和 \bar{I}_2 取最小值对应的轴向距离均为 39.6 mm。因为实验中采用的是单层粒子场,所以两个再现粒子像的在焦位置应该是一致的,由此可确定粒子场再现像的在焦再现距离 $d' = 39.6$ mm。可见,数字全息图切趾后再现显著提高了再现粒子像在焦位置的测量精度。

为进一步验证上述方法的有效性,在相同的实验条件下,记录了图 6(a)所示的数字全息图。图 6(b),(c)分别是在未切趾和切趾参数 $r = 0.3$,再现距离均为 39.1 mm 时对应的再现像。

以图 6(b),(c)中虚线框中的两个再现粒子像作为比较对象,图 6(d),(e)是对应的局部放大图。取轴向再现距离的变化范围为 38.5~39.9 mm,分别取这两个再现粒子像在不同切趾参数和不同再现距离下对应的中央区域的平均强度 \bar{I}_1' (上侧粒子)

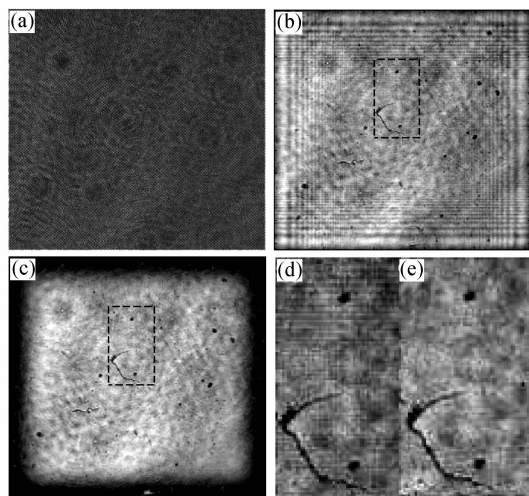


图6 粒子场数字全息图(a)及其在 $r=0$ (b), $r=0.3$ (c)时的再现像,(d),(e)为再现像的局部放大图
Fig.6 Particle digital hologram (a), reconstructed images with parameter $r=0$ (b) and $r=0.3$ (c), (d) and (e) separately partially magnified pictures in (b) and (c)

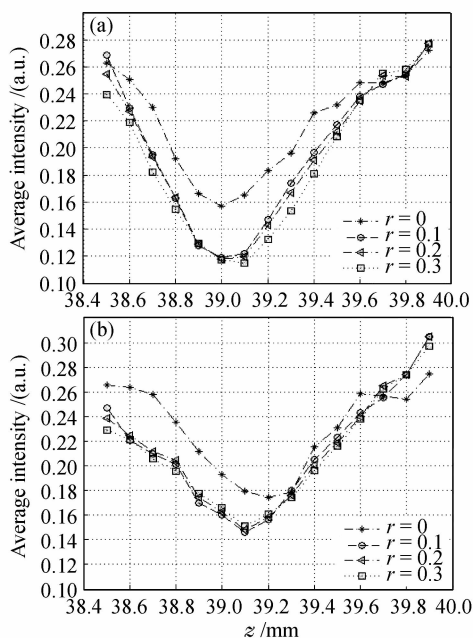


图7 粒子再现像中央区域的平均强度随轴向再现距离的变化。(a) 上侧粒子;(b) 下侧粒子
Fig.7 Variations of the central average intensity of the reconstructed image of particle with the reconstructed distance. (a) upside particle; (b) underside particle

和 \bar{I}_2' (下侧粒子),得到在不同切趾参数下每个粒子中心区域的平均强度随轴向再现距离的变化曲线,分别如图7(a),(b)所示。可见,当 $r=0$ 时,两个再现粒子像的在焦位置之差为0.2 mm;当 $r=$

0.1和0.2时,两个再现粒子像的在焦位置相差0.1 mm;当 $r=0.3$ 时, \bar{I}_1 和 \bar{I}_2 取最小值对应的轴向距离均为39.1 mm。因此可以确定该粒子场再现像的在焦再现距离 $d''=39.1$ mm。由此进一步验证了全息图加窗切趾处理有利于提高粒子场在焦位置的测量精度。

4 结 论

提出采用能量透射率较大、频谱旁瓣峰值和旁瓣衰减斜率较小的 Tukey 窗对粒子场数字全息图进行切趾处理。实验结果表明,全息图切趾后的再现像中已不存在黑白相间的干涉条纹,衬比度增强,再现粒子像更清晰,为尽可能地保持再现像的完整性,Tukey 窗函数的参数应小于0.4;切趾参数在某一个范围内变化时,粒子场在焦位置测量的误差随切趾参数的增大而减小,可准确确定重建粒子场中粒子在焦位置,提高粒子场在焦位置的测量精度。

参 考 文 献

- 1 G. Pan, H. Meng. Digital holography of particle fields: reconstruction by use of complex amplitude [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(5):827~833
- 2 W. Xu, M. H. Jericho, H. J. Kreuzer *et al.*. Tracking particles in four dimensions with in-line holographic microscopy [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(3):164~166
- 3 G. Hassman, W. Lauterborn. Determination of size and position of fast moving gas bubbles in liquids by digital 3-D image processing of hologram reconstructions [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(20):3529~3535
- 4 B. A. Weiss, P. Derov, D. Debiase *et al.*. Fluid particle sizing using a fully automated optical imaging system [J]. *Opt. Eng.*, 1984, **23**(5):561~566
- 5 S. Murata, N. Yasuda. Potential of digital holography in particle measurement [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2000, **32**:567~574
- 6 Fan Qi, Zhao Jianlin, Xiang Qiang *et al.*. Methods of improving resolution of digital holographic microscopy[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(2):226~230
- 7 范琦,赵建林,向强等.改善数字全息显微术分辨率的几种方法[J]. *光子学 • 激光*, 2005, **16**(2):226~230
- 7 M. Adams, Th. Kreis, W. Jüptner. Particle measurement with digital holography [C]. *SPIE*, 1999, **3823**:38~43
- 8 Yuan Boyu, Wu Xiaojuan, Chen Shenhao *et al.*. Measurement of concentration change distribution based on theory of interference and image processing methods [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):82~88
- 9 袁博宇,吴晓娟,陈慎豪等.基于干涉原理和图像处理方法的浓度变化分布测量[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1):82~88
- 9 Sun Liujie, Zhuang Songlin. Anti-fake technique by double random phase encrypted holographic mark [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1):31~34
- 10 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
- 10 E. Cuche, P. Marquet, C. Depeursinge. Aperture apodization using cubic spline interpolation; application in digital

- holographic microscopy [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **182**:59~69
- 11 R. Józwicki, J. Bartold, M. Prytulak. Application of digital hologram apodization for surface shape measurement methods [C]. *SPIE*, 2006, **6254**:625415
- 12 Zhang Yancoo, Zhao Jianlin, Zhang Wei *et al.*. Digital hologram apodization using Tukey-window function [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12):2256~2260
张延曹, 赵建林, 张伟 等. Tukey 窗函数用于数字全息图的切趾研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(12):2256~2260
- 13 T. M. Kreis. Frequency analysis of digital holography with reconstruction by convolution [J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(8):1829~1839
- 14 H. H. Yeong, J. A. Pearce. A new window and comparison to standard windows [J]. *IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1989, **37**(2):298~301
- 15 M. Jacquot, P. Sandoz. Sampling of two-dimensional images: prevention from spectrum overlap and ghost detection [J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(1):214~223
- 16 M. Vlcek, R. Unbehauen. Note to the window function with nearly minimum sidelobe energy [J]. *IEEE Trans. Circuits and Systems*, 1990, **37**(10):1323~1324
- 17 A. H. Nuttall. Some windows with very good sidelobe behavior [J]. *IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1981, **29**(1):84~91
- 18 F. J. Harris. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform [J]. *Proc. IEEE*, 1978, **66**(1):51~83
- 19 T. Kreis, M. Adams, W. Jüptner. Digital in-line holography in particle measurement [C]. *SPIE*, 1999, **3744**:54~64