

文章编号: 0258-7025(2010)06-1602-05

切趾数字全息术在相位测量中的应用

张延曹¹ 赵建林¹ 范琦² 杨盛²

¹ 西北工业大学理学院, 陕西省光信息技术重点实验室, 空间应用物理与化学教育部重点实验室, 陕西 西安 710072

² 空军工程大学理学院, 陕西 西安 710051

摘要 数字全息术中, 全息像的再现过程由于受激光散斑、系统噪声以及全息图边沿衍射等效应的影响, 再现像质量降低, 因而制约了其在相位测量中的应用。将切趾方法应用到数字全息相位测量中, 用 Hanning 窗对全息图进行切趾处理, 以抑制再现像中的边沿衍射效应及噪声的影响。模拟实验和实物实验结果表明, 切趾方法能够很好地抑制边沿衍射效应以及噪声对再现物光波相位的影响, 提高了相位测量的精度。

关键词 数字全息术; 切趾; 边沿衍射; Hanning 窗函数

中图分类号 TN 247; O 438; TB 877 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103706.1602

Application of Apodization Digital Holography in Phase Measurement

Zhang Yancao¹ Zhao Jianlin¹ Fan Qi² Yang Sheng²

¹ Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, The Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry, Ministry of Education, 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 In digitally holographic reconstruction, the reconstructed image quality is reduced by the effect of the laser speckle, the system noise and the border diffraction of the digital hologram, which restrains the application of digital holography in phase measurement. In this paper, we apply the apodization for the phase measurement in digital holography to suppress the diffraction and noise effects. Simulations and experiments show that apodization can effectively reduce the border diffraction and noise effects to the reconstructed phase information of the objected wave and improve the measurement precision.

Key words digital holography; apodization; border diffraction; Hanning window function

1 引言

数字全息术因其能够数字记录全息图和实时再现物体三维信息的优势, 正在取代传统全息技术并被应用到光学测量的众多领域, 如数字全息显微测量^[1,2]、粒子场测量^[3,4]、面形检测^[5,6]、形貌测量^[7]等。数字全息术中, 再现像的质量主要由记录全息图的电荷耦合器件(CCD)的靶面尺寸和空间分辨率决定。受 CCD 靶面尺寸和矩形孔径的影响, 所记录的数字全息图一般尺寸较小且为矩形。T. Kreis^[8,9]从空间频谱分析入手, 研究了数字全息成

像系统的特性, 并指出该成像系统的点扩散函数为 sinc 函数。sinc 函数的高旁瓣能量决定了数字全息再现过程中必然会出现全息图边沿的衍射效应。E. Cucho 等^[10]分析了衍射效应对再现像的具体影响, 发现衍射导致再现像的强度和相位出现振荡, 这种振荡的程度在孔径边缘处尤为显著, 严重地降低了再现像的质量。于是他们提出了一种采用三次样条插值的孔径切趾方法来消除孔径衍射。R. Jówicki 等^[11]分析了噪声对重建物场相位解包裹精度的影响, 指出通过对数字全息图采用切趾处理, 可

收稿日期: 2010-01-15; 收到修改稿日期: 2010-02-06

基金项目: 航空科学基金(2006ZD53042)资助课题。

作者简介: 张延曹(1965—), 男, 博士研究生, 副教授, 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, 博士, 教授, 主要从事光信息技术及应用等方面的研究。E-mail: jlzhao@nwpu.edu.cn

(通信联系人, 中国光学学会会员号: S040420657S)

提高解包裹的精度。在实际物场的重建过程中,孔径衍射效应也会影响到重建物场的相位分布,仅考虑噪声的影响是不够的。

在早期的研究中,本文作者曾采用 Tukey 窗函数切趾数字全息图^[12]取得了很好的效果,并将切趾术应用到粒子场测量^[13,14]中,实验证明粒子全息图切趾后再现能够提高粒子观测精度。本文通过模拟有噪声和无噪声两种情况下光波的相位传播特点,

分析了衍射效应和噪声对重建相位的影响以及切趾处理的作用,并进行了实验验证。

2 数字全息术及切趾法原理

数字全息图记录和再现原理如图 1 所示。设物光波和参考光波在全息图平面的复振幅分布分别为 $O(x_H, y_H)$ 和 $R(x_H, y_H)$, 则全息图平面上的物光波和参考光波叠加后的光场分布为

$$H(x_H, y_H) = |O + R|^2 = |O(x_H, y_H)|^2 + |R(x_H, y_H)|^2 + O(x_H, y_H)R^*(x_H, y_H) + O^*(x_H, y_H)R(x_H, y_H), \quad (1)$$

采用 CCD 记录全息图时,只能得到离散的光强分布。设 CCD 包含 $M \times N$ 个像素,像素尺寸为 $\Delta x_H \times \Delta y_H$, 则离散化后的全息图灰度分布为

$$H(u, v) = H(x_H, y_H) \text{rect}\left(\frac{x_H}{M\Delta x_H}, \frac{y_H}{N\Delta y_H}\right) \sum_u^M \sum_v^N \delta(x_H - u\Delta x_H, y_H - v\Delta y_H), \quad (2)$$

式中 u 和 v 为整数,并且满足条件 $-M/2 \leq u \leq M/2, -N/2 \leq v \leq N/2$ 。

设再现照明光波在全息图平面的复振幅分布为 $E(x_H, y_H)$, 则在菲涅耳近似条件下,距离全息图平面 d 处的光场分布为

$$U(x_1, y_1) = \frac{\exp(jkd)}{j\lambda d} \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda d}(x_1^2 + y_1^2)\right] \times \iint_{\Sigma} T(x_H, y_H) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda d}(x_H^2 + y_H^2)\right] \exp\left[-\frac{jk}{d}(x_H x_1 + y_H y_1)\right] dx_H dy_H, \quad (3)$$

式中 λ 为激光波长, $k = 2\pi/\lambda$, $T(x_H, y_H) = E(x_H, y_H)H(x_H, y_H)$ 。将(3)式改写成傅里叶变换形式,得到

$$U(x_1, y_1) = \frac{\exp(jkd) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda d}(x_1^2 + y_1^2)\right]}{j\lambda d} \mathcal{F}_F \left\{ T(x_H, y_H) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda d}(x_H^2 + y_H^2)\right] \right\}, \quad (4)$$

式中 \mathcal{F}_F 表示快速傅里叶变换运算。由(4)式即可计算得到再现像的复振幅分布。

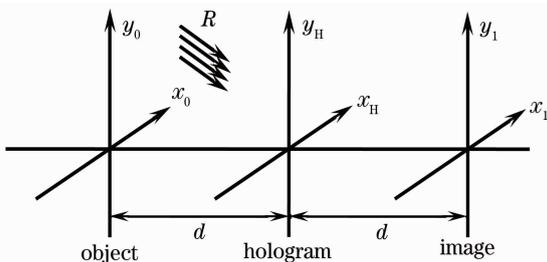


图 1 数字全息图记录和数值再现原理

Fig. 1 Principle of recording digital hologram and numerical reconstruction

切趾处理的实质就是降低旁瓣,它相当于在一个成像系统的出射光瞳中引入衰减,这种衰减对光瞳中央区域的影响不大,但随离开中心距离的增大而增大。在实际的光学应用中,切趾处理类似于在光路中引进一块衰减掩模来软化孔径的边沿。突变的孔径边沿的衍射可以视为来自孔径边沿附近的边

界波,对边沿软化的效果,就是把这些衍射波的发源地伸展到光瞳边缘更广阔的面积上,从而抑制发源地高度局域化的边界波所产生的振铃效应^[15]。设二维窗函数为 $Q(u, v)$, 则数字全息图切趾操作为

$$H'(u, v) = H(u, v)Q(u, v). \quad (5)$$

图 2 给出了矩形窗函数和 Hanning 窗函数的空域和频域形式。由图 2(a)可见,全息图的矩形孔径边沿处振幅直接由 1 跳变成 0。用作切趾的 Hanning 窗则具有一个渐变的孔径,振幅透射率由 1 平滑衰减至零。比较二者的频域形式,如图 2(b), Hanning 窗具有比矩形窗更低的旁瓣能量和更快的旁瓣衰减速率。对数字全息图作切趾处理后,成像系统的旁瓣能量降低,再现像中的衍射效应得到抑制。另外,全息图在记录过程中,难免会受到激光散斑和系统噪声的影响,噪声成分在频域中的分布集中在高频部分,切趾降低旁瓣的实质也是减弱高频信息。因此,对数字全息图作切趾处理,同样能够抑制系统噪声对再现像的影响。

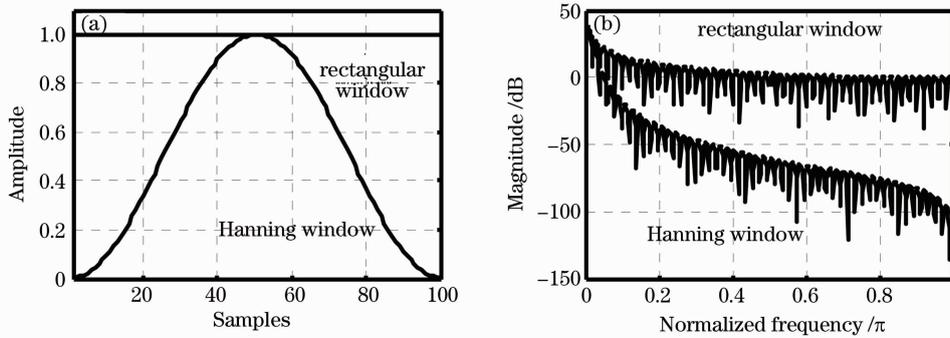


图 2 矩形窗及 Hanning 窗的空域(a)和频域(b)形式

Fig. 2 Characteristics of rectangle and Hanning windows in space-domain (a) and frequency-domain (b)

3 模拟分析

数字全息像的再现过程,实质上就是将全息图平面处的再现物光波传播至再现像平面,从而得到原始物光波前。以无噪声和有噪声两种情况下标准球面波的传播为例,模拟数字全息图再现中的光波传播,分析切趾处理对衍射效应和噪声的抑制作用。图 3 给出了模拟实验的光路示意,平面 1 处的光强为距离 0.5 m 处的点光源发出的波长为 632.8 nm 的标准球面波,采集到的图像大小为 1024 pixel \times 1024 pixel,像素尺寸为 5 μm \times 5 μm 。

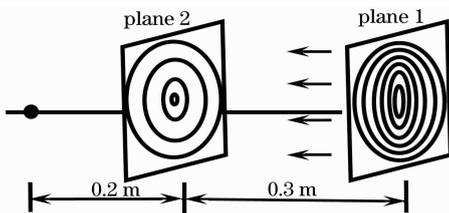


图 3 模拟标准球面波传播示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the spherical wave propagation

对图 4(a)所示球面波采用菲涅耳衍射处理,传播距离为 0.3 m,得到如图 4(b)所示相位包裹图。图 4(c)是对图 4(a)采用 Hanning 窗切趾处理的结果,图 4(d)是对应的传播后的包裹相位图。通过比较图 4(b)和(d)无法判断出球面波相位分布的优劣。因此,取两个包裹相位图中间一行的包裹相位进行比较,结果如图 4(e)所示。图 4(e)中可以清楚地看到,未切趾传播的包裹相位里出现很明显的振荡,而切趾后的包裹相位里不存在振荡。对图 4(e)中的包裹相位进行一维解包裹处理,结果如图 4(f)所示。可以看出,解包裹后的相位分布显示出很好的球面特征,取其中一段放大,明显看出未经切趾处理的解包裹相位分布中存在较大的振荡,而切趾处理后的解包裹相位分布则相对很光滑。可见,切趾

处理能够很好地抑制衍射效应导致的相位振荡。

记录数字全息图时,系统误差和实验噪声必然会被引入全息图,从而降低了相位测量的精度。对图 4(a)所示标准球面波进行加噪处理并传播(记录和传播条件不变),结果如图 5 所示。其中图 5(a)为加入高斯噪声的球面波。对比图 5(b)和(d)可以发现,切趾后传播得到的包裹相位图明显比未切趾得到的包裹相位图更清晰,噪声得到了有效的抑制。取相同标记行的包裹相位图进行解包裹,结果如图 5(e)所示。图 5(e)中未进行切趾处理的解包裹曲线非常粗糙,包裹相位没有完全解开;而采用切趾处理后,解包裹后的相位分布明显光滑连续,符合球面分布。由于噪声在频域中的分布集中在高频区域,对球面波进行切趾处理后,减弱了高频信息对相位的影响。

4 实验及结果

实验中采用 He-Ne 激光器作光源,波长为 632.8 nm。图 6 所示为用于相位测量的数字全息图记录光路。自激光器发出的细激光束经扩束、准直后,再经分束镜 BS_1 分成两束,其中一束依次经反射镜 M_2 和分束镜 BS_2 反射后,作为参考光照射到 CCD 上;另一束依次经反射镜 M_1 反射和待测物体及分束镜 BS_2 透射后,作为物光照射到 CCD 上。被记录物体是一块傅里叶透镜。图 7 所示为实验结果。其中图 7(a)为实验记录的数字全息图,首先采用频谱滤波法去除全息图的零级和共轭衍射谱,然后采用菲涅耳变换法重建全息像,再现距离为 0.12 m;图 7(b)为得到的再现物光波前的包裹相位图,在其边界区域可以看到明显的噪声误差。图 7(d)是用 Hanning 窗切趾后的数字全息图,相应的包裹相位图如图 7(e)所示。与图 7(b)比较,可以看出该包裹相位图中的噪声已得到很好的抑制。

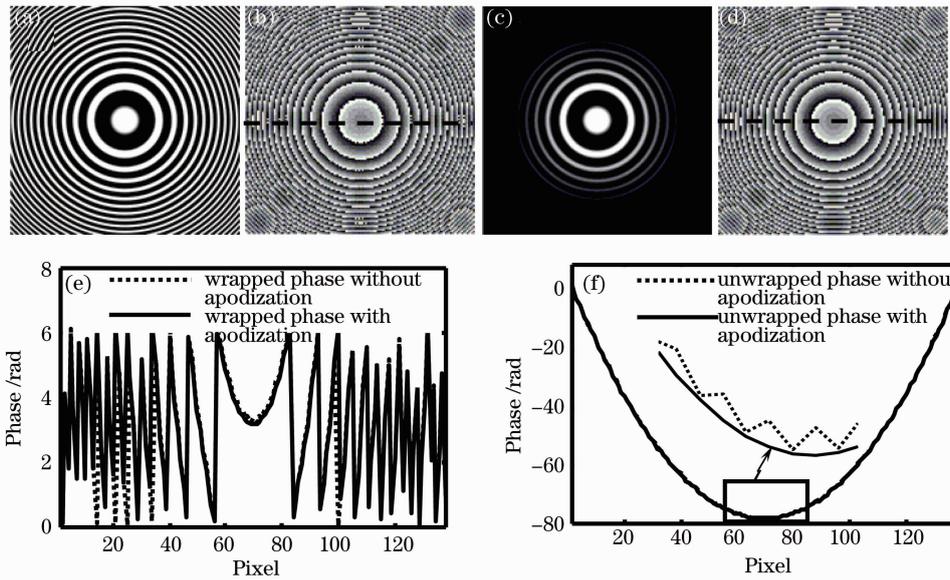


图 4 无噪声条件下的标准球面波。(a)模拟的标准球面波；(b)传播后的包裹相位；(c)切趾后的球面波；(d)切趾后传播的包裹相位图；(e)标记行的包裹相位分布；(f)标记行的解包裹相位分布

Fig.4 Spherical wave without noise. (a) simulated standard spherical wave; (b) wrapped phase after propagation; (c) phase of spherical wave with apodization; (d) wrapped phase after propagation with apodization; (e) wrapped phase extracted from the phase map; (f) unwrapped phase distribution

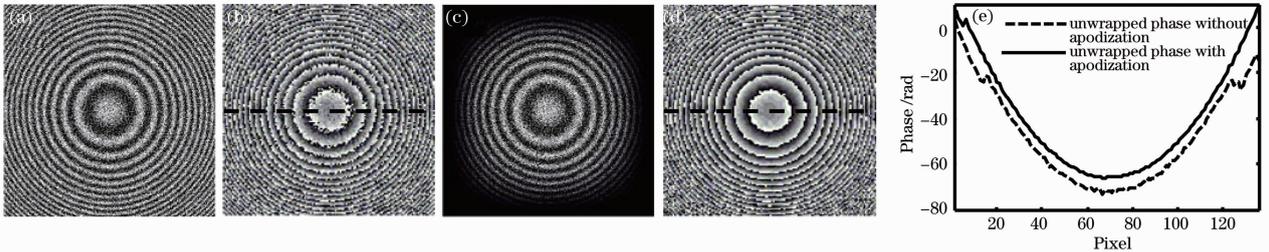


图 5 噪声条件下球面波的传播。(a)带有噪声的球面波；(b)传播后的包裹相位图；(c)切趾后的球面波；(d)切趾传播后的包裹相位图；(e)标记行的解包裹相位分布

Fig.5 Propagation of spherical wave with noise. (a) spherical wave with noise; (b) wrapped phase map after propagation; (c) phase of spherical wave with apodization; (d) wrapped phase map after propagation with apodization; (e) unwrapped phase distribution extracted from phase map

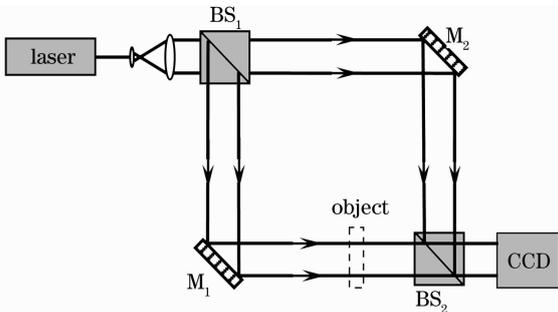


图 6 实验光路示意图

Fig.6 Schematic diagram of the experiment setup
对二维包裹相位图7(b)和(e)进行解包裹处

理,结果如图 7(c)和(f)所示。图 7(g)所示为图 7(c)和(f)中沿白色虚线标记行的相位分布。实验中的待测傅里叶透镜为标准透镜,所记录的物光波应为平面波通过该透镜形成的标准球面波。因此,测量得到的物光波波前的相位应具有连续的球面分布。受数值再现过程中衍射效应和噪声的影响,实际再现光波波前的相位分布相对标准球面波波前的相位分布差异较大,如图 7(g)中虚线所示。采用切趾再现的结果如图 7(g)中实线所示,衍射效应和噪声得到很好的抑制,再现相位分布符合球面分布。

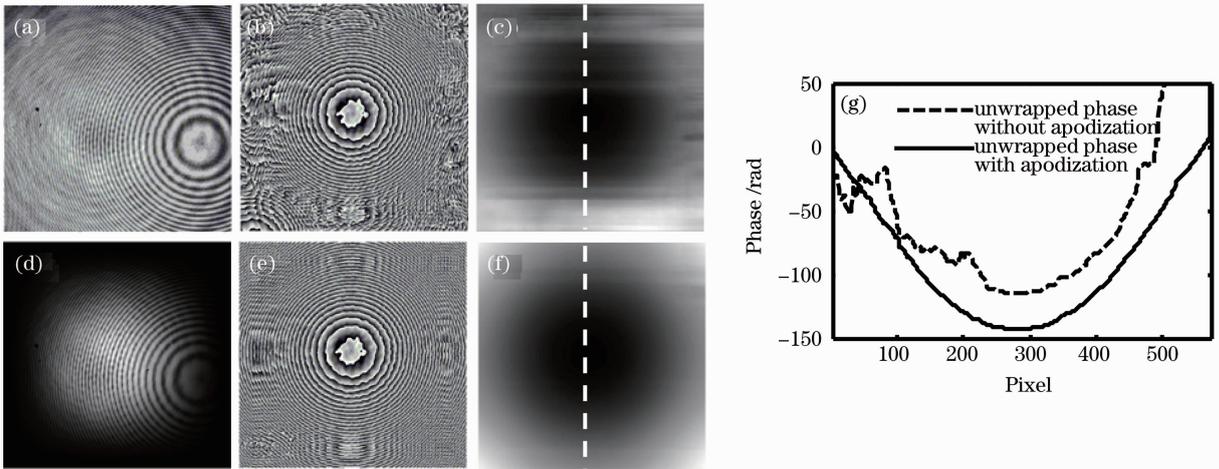


图 7 实验记录全息图及再现。(a)~(c)全息图直接再现的相位信息;(d)~(f)全息图切趾后再再现的相位信息;(g)解包裹后的一行相位分布

Fig. 7 Recorded hologram and its reconstruction. (a)~(c) reconstructed phase map without apodization; (d)~(f) reconstructed phase with apodization; (g) phase distribution extracted from unwrapped phase map

5 结 论

由于 CCD 靶面的有限孔径,数字全息图再现系统的点扩散函数具有很高的旁瓣,导致再现过程中出现明显的衍射效应,降低了再现像的质量。另外,由于激光散斑以及其他实验噪声的存在,数值再现物场的相位分布还受到噪声的影响,从而也会使物体相位测量的精度降低。将切趾法应用到数字全息相位测量中,用 Hanning 窗对全息图进行切趾处理。模拟和实物实验结果表明,数字全息图经切趾处理后,能够有效抑制衍射效应以及噪声对再现物光波相位分布的影响,提高相位测量的精度。

参 考 文 献

- 1 E. Cuche, P. Marquet, C. Depeursinge. Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(34): 6994~7001
- 2 E. Cuche, Frédéric Bevilacqua, Christian Depeursinge. Digital holography for quantitative phase-contrast imaging [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(5): 291~293
- 3 Sébastien Coëtmelec, Denis Lebrun, Cafer Özkul. Application of the two-dimensional fractional-order Fourier transformation to particle field digital holography[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(8): 1537~1546
- 4 Ferréol Soulez, Loïc Denis, Éric Thiébaud *et al.*. Inverse problem approach in particle digital holography: out-of-field particle detection made possible [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, **24**(12): 3708~3716
- 5 Toshiaki matsuura, Satoru Okagaki, Yasushi Oshikane *et al.*. Numerical reconstruction of wavefront in phase-shifting point diffraction interferometer by digital holography [J]. *Surf. Interface Anal.*, 2008, **40**(6-7): 1028~1032

- 6 I. Yamaguchi, J. Kato, S. Ohta *et al.*. Image formation in phase-shifting digital holography and applications to microscopy [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(34): 6177~6186
- 7 U. Schnars, W. Jüptner. Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(2): 179~181
- 8 T. Kreis. Frequency analysis of digital holography [J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(4): 771~778
- 9 T. Kreis. Frequency analysis of digital holography with reconstruction by convolution [J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(8): 1829~1839
- 10 E. Cuche, Pierre Marquet, Cjrostoam Depeursinge. Aperture apodization using cubic spline interpolation: application in digital holographic microscopy[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **182**(1~3): 59~69
- 11 R. Jöwicki, J. Bartold, M. Prytulak. Application of digital hologram apodization for surface shape measurement methods [C]. *SPIE*, 2006, **6254**: 625415
- 12 Zhang Yancao, 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 窗用于数字全息图的切趾研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(12): 2256~2260
- 13 Zhang Yancao, Zhao Jianlin, Fan Qi *et al.*. Application of digital hologram apodization using Tukey-window for particle in-focus position measurement [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1542~1547
张延曹,赵建林,范 琦等. Tukey 窗切趾全息图用于粒子场在焦位置测量的实验研究 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1542~1547
- 14 Yancao Zhang, Jianlin Zhao, Qi Fan *et al.*. Improving the reconstruction quality with extension and apodization of digital hologram [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(16): 3070~3074
- 15 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics [M]. Third Edition, Qin Kecheng Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 136~137
J. W. Goodman. 傅里叶光学导论 [M]. 第三版, 秦克诚译. 北京: 电子工业出版社, 2006. 136~137