

# 太赫兹伽栢同轴数字全息自动聚焦研究

李 琦 胡佳琦 李运达

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要** 太赫兹数字全息是太赫兹成像技术的重要研究方向。由于太赫兹波长相对较长,使得太赫兹同轴数字全息的记录距离一般都比较近,因此系统记录距离的准确测量意义重大。对真实 2.52 THz 伽栢同轴数字全息图应用 5 种自动聚焦判别函数,通过截取再现像目标提高了判别精度。实验结果表明归一化方差判据函数最好,证明了 5 种自动聚焦判别函数应用于太赫兹同轴数字全息的可行性。

**关键词** 成像系统;太赫兹;全息;自动聚焦;同轴数字全息图

**中图分类号** TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.s111001

## Autofocusing Research on Terahertz Gabor Inline Digital Holography

Li Qi Hu Jiaqi Li Yunda

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

**Abstract** Terahertz (THz) digital holography is an important research aspect of terahertz imaging technology. The recording distance of terahertz digital holography is generally short because of the long wavelength and restriction of the detector. The exact measurement of the real recording distance is of great significance. Autofocusing researches have been made on real 2.52 THz Gabor inline digital holograms based on five kinds of autofocusing criterion functions. The criterion precision is improved by cropping object in the reconstructed images. The experimental results show that the performance of normalized variance criterion function is the best. The results verify the feasibility of applying five kinds of autofocusing criterion functions to terahertz inline digital holography.

**Key words** imaging systems; terahertz; holography; autofocusing; inline digital hologram

**OCIS codes** 110.0110; 110.6795; 110.2990; 110.3000

## 1 引 言

太赫兹(THz)数字全息成像,是太赫兹技术与数字全息成像技术的结合,是当今太赫兹成像技术的前沿之一<sup>[1-4]</sup>。数字全息图再现的图像质量与再现距离密不可分。由于太赫兹波长相对较长,且使用的探测器像元数目较少、像元尺寸较大,使得太赫兹数字全息的记录距离一般都比较近,尤其同轴数字全息距离更近,因此系统记录距离的准确测量对数字全息再现像的质量十分重要<sup>[5]</sup>。自动聚焦方法可以通过相应的聚焦算法自动确定最佳的再现距离,从而降低了对系统记录距离测量精度的要求。

聚焦判据函数是实现数字全息自动聚焦的关键,在可见光波段已提出了许多聚焦判据函数<sup>[6-11]</sup>,但尚未将其应用到同轴太赫兹数字全息的自动聚焦中。

对真实太赫兹伽栢(Gabor)同轴数字全息图像利用角谱再现算法获得的再现像,进行了自动聚焦实验研究。所用聚焦判据函数包括 Tenenbaum 梯度(TEG)判据函数、Prewitt 梯度(PRG)判据函数、标准偏差相关(STD)判据函数、归一化方差(NOV)判据函数和改进的拉普拉斯和(SML)判据函数。为了提高自动聚焦精度,本文采用截取再现像目标区域方法,并且比较了有无再现像截取情况下,5种

**收稿日期**: 2014-01-22; **收到修改稿日期**: 2014-02-26

**基金项目**: 国家自然科学基金(61377110)、高等学校博士学科点专项科研基金(20112302110028)

**作者简介**: 李 琦(1963—),女,博士,教授,主要从事激光与太赫兹成像及图像处理等方面的研究。

E-mail: liqi2013@hit.edu.cn

判别函数对将 4 帧全息图叠加平均后的再现结果的自动聚焦效果。

## 2 基本原理

由于 Gabor 同轴全息中一般目标相对探测器尺寸不大,而且目标大致位置已知,因此,本文提出采用截取再现像目标区域代替整幅再现像的方法,避免较多背景的干扰,从而提高自动聚焦精度。截取区域以包括整个目标为宜。

### 2.1 角谱再现算法

太赫兹 Gabor 同轴数字全息记录装置参见文献[4,12]。图 1 给出基本原理示意图。准直后的平面波照射物体,被物体信息调制的光作为物光,其余透射的光作为参考光。参考光与物光在探测器表面

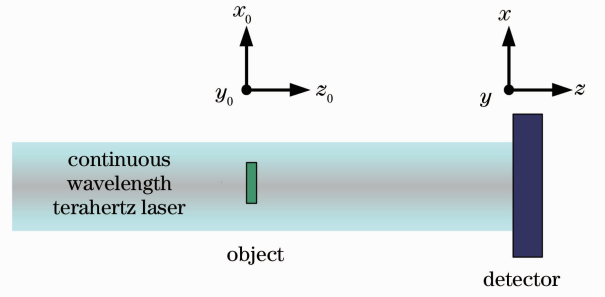


图 1 太赫兹 Gabor 同轴数字全息示意图

干涉获得干涉图样。

角谱再现方法将物平面上的单色光波场在  $x_0 - y_0$  平面上进行傅里叶变换以获得其频谱,即将入射光波视为沿不同传播方向的平面波的叠加,其叠加权重表示为

$$A(f_{x_0}, f_{y_0}, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x_0, y_0, 0) \exp[-i2\pi(x_0 f_{x_0} + y_0 f_{y_0})] dx_0 dy_0 = \mathcal{F}[U(x_0, y_0, 0)], \quad (1)$$

式中  $A(f_{x_0}, f_{y_0}, 0)$  代表物平面的角谱分布,  $U(x_0, y_0, 0)$  代表物平面上的光场分布,  $\mathcal{F}$  代表傅里叶变换,  $f_{x_0}$  和  $f_{y_0}$  分别代表  $x_0$  方向、 $y_0$  方向的空间频率。

空间频率为  $(f_x, f_y, f_z)$  的平面波经距离  $z$  的传播后,其复振幅为

$$A(f_x, f_y, z) = \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} z \sqrt{1 - \lambda^2 f_x^2 - \lambda^2 f_y^2}\right) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x, y, 0) \exp[-i2\pi(x f_x + y f_y)] dx dy, \quad (2)$$

$$U(x, y, z) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F}[U(x, y, 0)] \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} z \sqrt{1 - \lambda^2 f_x^2 - \lambda^2 f_y^2}\right) \right\}.$$

光波在自由空间中由衍射平面到观测平面的传播过程,在频域中等效于通过一个半径为  $1/\lambda$  的理想低通滤波器,其传递函数为

$$H_A(f_x, f_y, z) = \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} z \sqrt{1 - \lambda^2 f_x^2 - \lambda^2 f_y^2}\right). \quad (3)$$

傅里叶变换通过离散傅里叶变换近似计算。在计算时,需要考虑传递函数的离散取样是否满足奈奎斯特采样定理的要求。设物空间取样范围  $X \times Y$ , 取样点大小  $\Delta x \times \Delta y$ , 取样数  $N \times M$ , 即  $X \times Y = N \Delta x \times M \Delta y$ 。角谱法必须满足采样条件:

$$\frac{|z|}{X} \leq \begin{cases} \frac{Y}{X} \frac{\Delta y}{\Delta x} \sqrt{\frac{1}{(\lambda/\Delta x)^2} - \frac{1}{4} \left[ \left( \frac{Y}{X} \right)^2 + 1 \right]}, & \text{if } \frac{Y}{X} \frac{\Delta y}{\Delta x} \leq 1 \\ \sqrt{\frac{1}{(\lambda/\Delta x)^2} - \frac{1}{4} \left[ \left( \frac{Y}{X} \right)^2 + 1 \right]}, & \text{if } \frac{Y}{X} \frac{\Delta y}{\Delta x} \geq 1 \end{cases}. \quad (4)$$

### 2.2 自动聚焦函数

#### 1) TEG 判据函数

TEG 判据函数<sup>[10]</sup>的依据是通过提取图像边缘,对其求和,所得的值随图像像质变好而增大。采用  $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$  的 Sobel 算子与像素矩阵卷积来估计  $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$  图像在水平方向和垂直方向的梯度,图像越清晰,检测到的边缘成分越多。为了

加强边缘的作用,对梯度进行平方运算,其表达式为

$$T_{\text{EG}} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \{ [I_x^T(i, j)]^2 + [I_y^T(i, j)]^2 \}, \quad (5)$$

式中

$$I_x^T(i,j) = \frac{1}{4}[2I(i,j+1) - 2I(i,j-1) + I(i-1,j+1) - I(i-1,j-1) + I(i+1,j+1) - I(i+1,j-1)],$$

$$I_y^T(i,j) = \frac{1}{4}[2I(i-1,j) - 2I(i+1,j) + I(i-1,j-1) - I(i+1,j-1) + I(i-1,j+1) - I(i+1,j+1)], \quad (6)$$

TEG 的最大值对应于聚焦像。

## 2) PRG 判据函数

PRG 判据函数<sup>[10]</sup>的依据同 TEG 判据函数相同。PRG 判据函数通过图像与 3 pixel×3 pixel 的 Prewitt 算子卷积,将卷积结果取平方再求和,即

$$P_{RG} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \{[I_x^P(i,j)]^2 + [I_y^P(i,j)]^2\}, \quad (7)$$

式中  $I_x^P(i,j)$  与  $I_y^P(i,j)$  分别为图像与垂直方向 Prewitt 算子和水平方向 Prewitt 算子卷积的结果,即:

$$I_x^P(i,j) = [I(i+1,j-1) + I(i+1,j) + I(i+1,j+1) - I(i-1,j-1) - I(i-1,j) - I(i-1,j+1)],$$

$$I_y^P(i,j) = [I(i-1,j+1) + I(i,j+1) + I(i+1,j+1) - I(i-1,j-1) - I(i,j-1) - I(i+1,j-1)]. \quad (8)$$

## 3) STD 判据函数

STD 判据函数<sup>[6]</sup>是一种基于再现像强度统计的判据,利用相关作为评价再现像清晰度的函数,其表达式为

$$S = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i+1,j)I(i,j)] - MN\bar{I}^2, \quad (9)$$

式中  $I(i,j)$  表示像素点  $(i,j)$  对应的强度值,  $\bar{I}$  表示整幅图像的强度均值,即,  $\bar{I} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(i,j)$ 。

## 4) NOV 判据函数

NOV 判据函数<sup>[6]</sup>计算出再现像灰度值的方差,并对灰度值方差除以再现像的平均强度进行归一化,其表达式为

$$F_N = \frac{1}{MN\bar{I}} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i,j) - \bar{I}]^2. \quad (10)$$

此法可以有效地补偿不同再现像平均强度之间的差异。

## 5) SML 判据函数

SML 判据函数<sup>[11]</sup>是在拉普拉斯算子的基础上改进而来。通过计算水平和垂直方向的二阶差分绝对值和的平方进行比较判断。其表达式为

$$F_S = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_x^F(i,j) + I_y^F(i,j)]^2, \quad (11)$$

式中  $I_x^F(i,j)$  与  $I_y^F(i,j)$  分别为图像垂直方向和水平方向的梯度,即

$$I_x^F(i,j) = |2I(i,j) - I(i-1,j) - I(i+1,j)|,$$

$$I_y^F(i,j) = |2I(i,j) - I(i,j-1) - I(i,j+1)|. \quad (12)$$

## 3 实验结果及分析

自动聚焦实验中采用直径约 4 mm 金属片贴在透明胶带的成像结果,实验记录距离为 43 mm 左右,实物如图 2 所示。本文采用的数字全息图为 4 帧平均结果,如图 3 所示,图中左上角和右下角的黑

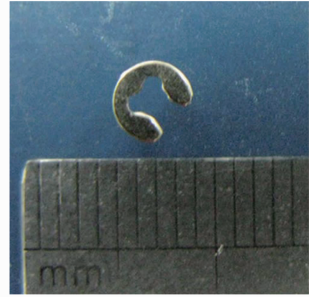


图 2 金属片实物照片

Fig. 2 Photo of a sheet metal object

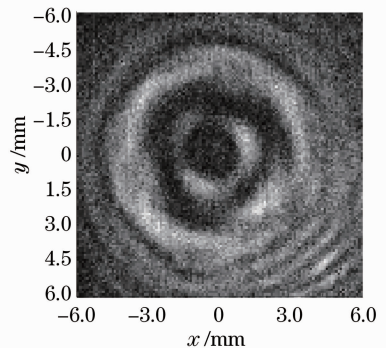


图 3 4 帧平均数字全息图

Fig. 3 4-frame-averaging hologram

点为探测器的坏点。

为了满足角谱算法适用条件 5), 本文通过对获得的全息图外围补零将其由  $124 \text{ pixel} \times 124 \text{ pixel}$  扩大至  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 。再现距离  $z$  的步进间隔为  $\Delta z = 0.05 \text{ mm}$ , 且各聚焦曲线均做了归一化处理。由角谱算法再现的不同距离处的强度像, 使用 5 种经典聚焦判据函数, 获得的聚焦曲线如图 4 所示。由图 4 可以看出, 当再现距离处于  $40.0 \sim 47.5 \text{ mm}$  之间时, STD 无单峰结构, 其他 4 种算法均呈单峰分布, TEG 和 PRG 极值点主峰比较明显。显然求边缘的自聚焦判据较好, 这主要因为目标边缘特性突出。TEG、STD、PRG、NOV 和 SML 分别测得的距离为  $42.50, 40.00, 42.50, 42.45, 42.15 \text{ mm}$ 。STD 结果为计算起点, 等于判断无效, TEG 和 PRG 结果相同, NOV 与它们再现距离相比低出  $0.05 \text{ mm}$ 。

为了验证各聚焦判据函数聚焦位置的准确性, 图 5 给出了  $z = 40.00, 42.15, 42.45, 42.50, 43.40, 43.65, 43.90, 45.05 \text{ mm}$  处的再现结果。从图中可

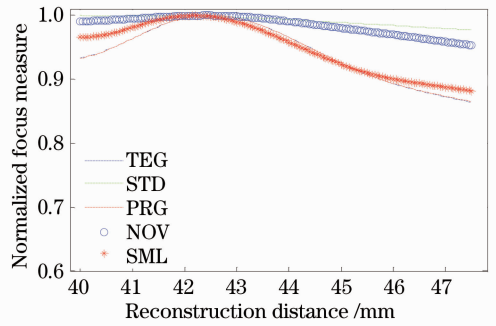


图 4 归一化聚焦度量和再现距离变化关系  
Fig. 4 Relationship of the normalized focus measure and reconstruction distance

知,  $z = 40 \text{ mm}$  时, 图像中目标非常模糊。从  $z = 42.15 \sim 43.65 \text{ mm}$  目标依次变得更为清晰。而由  $z = 43.90 \sim 45.05 \text{ mm}$  图像目标边缘依次变得较模糊。说明在以整幅再现图像作为判据函数计算依据时, TEG 和 PRG 方法更为接近真实焦点, 但与其相差约为  $1.15 \text{ mm}$ , 相对误差约为  $3\%$ ; STD 完全判断失误。

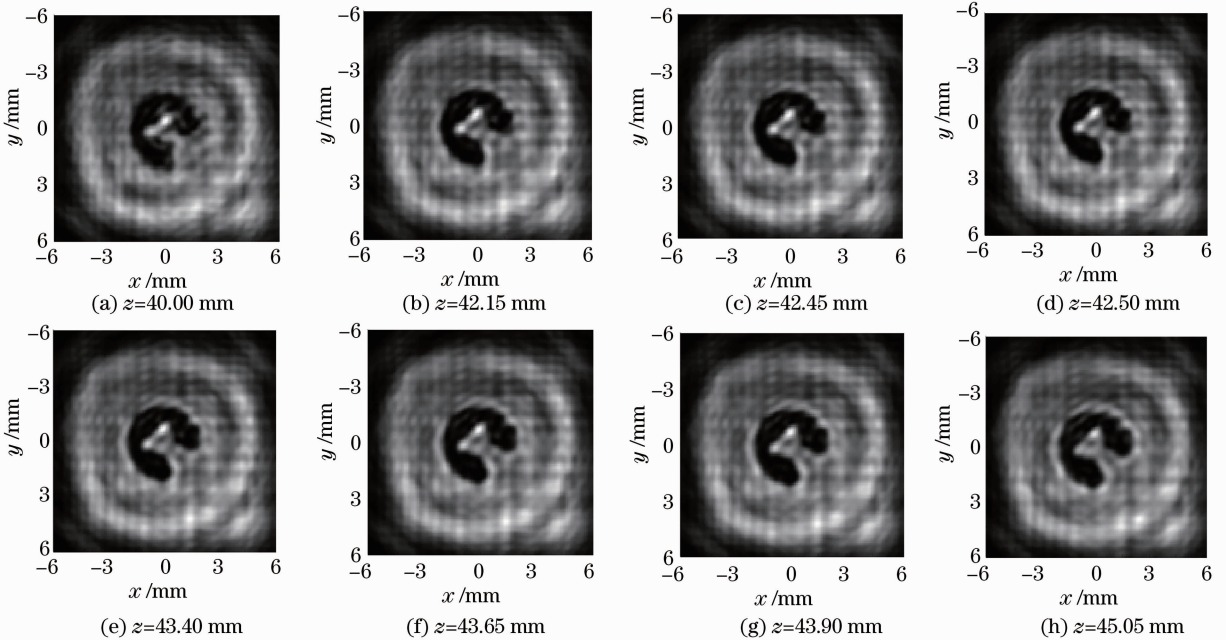


图 5 不同再现距离处数字全息再现像

Fig. 5 Digital holographic reconstruction images in different reconstruction distances

本文图像裁减从原图像 40 行至 88 行, 37 列至 85 列, 生成图像大小为  $49 \text{ pixel} \times 49 \text{ pixel}$ 。由角谱算法再现的不同距离处的强度像, 使用 5 种经典聚焦判据函数, 获得的聚焦曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出, 当再现距离处于  $40.0 \sim 47.5 \text{ mm}$  之间时, 5 种算

法均呈单峰分布, STD 极值点主峰极不明显, TEG 和 PRG 极值点主峰比较锐利、落差较大。TEG、STD、PRG、NOV 和 SML 分别测得的距离为  $43.40, 45.05, 43.40, 43.65, 43.90 \text{ mm}$ 。TEG 和 PRG 结果相同, NOV 与它们再现距离相比多出

0.25 mm。由图 5 已经判断出 NOV 效果最好,焦点更为准确,这可能是由于此法补偿了不同再现像平均强度之间的差异。TEG、PRG 和 SML 效果其次。STD 效果不好。

图 7 给出了  $z=43.40$ 、 $43.65$ 、 $43.90$ 、 $45.05$  mm 处的再现向截图结果,从图像偏左侧的金属片内部弯曲背景可以看出, $z=43.65$  mm 的再现结果最清晰。TEG、PRG、SML 和 NOV 能够实现自动聚焦,NOV 效果最好。

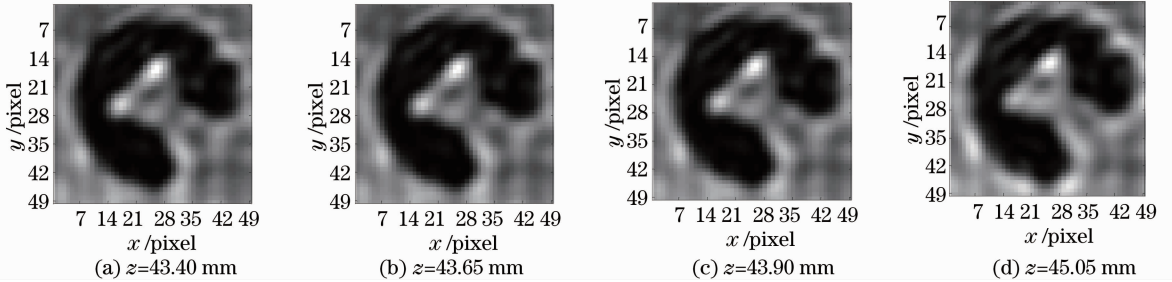


图 7 不同再现距离处的数字全息再现像截图

Fig. 7 Cropped reconstructed images in different reconstruction distances

## 4 结 论

由于太赫兹同轴数字全息的记录距离一般都较近,因此自动聚焦研究十分必要。利用真实 Gabor 同轴 2.52 THz 数字全息图像,通过角谱再现算法进行了自动聚焦实验研究。提出了通过截取的再现像目标区域进行聚焦判别。实验结果表明,通过截取再现像目标区域方法可以减小约 3% 的聚焦误差。利用该法,TEG、PRG 和 NOV 三种判据函数,可对文中 4 帧平均数字全息图有较好的自动聚焦效果,STD 算法应用效果最差,其次是 SML,NOV 效果最好。

## 参 考 文 献

- Li Qi, Ding Shenghui, Li Yunda, *et al.*. Advances in research of THz digital holography imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(5): 050006.
- 李琦, 丁胜晖, 李运达, 等. 太赫兹数字全息成像的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(5): 050006.
- M S Heimbeck, M K Kim, D A Gregory, *et al.*. Terahertz digital holography using angular spectrum and dual wavelength reconstruction methods [J]. *Opt Express*, 2011, 19(10): 9192–9200.
- Li Qi, Ding Shenghui, Li Yunda, *et al.*. Comparison between 2.

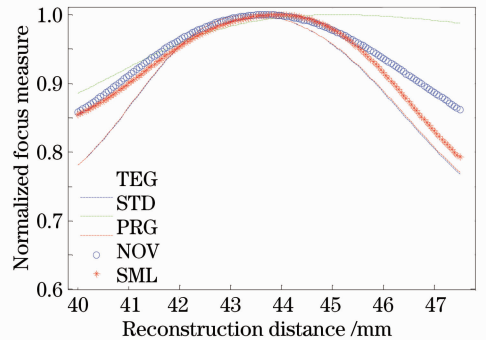


图 6 再现像截图后的归一化聚焦度量和再现距离变化关系

Fig. 6 Relationship of the normalized focus measure and reconstruction distance after the reconstruction images being cropped

- 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.
- Kai Xue, Qi Li, Yun Dali, *et al.*. Continuous-wave terahertz in-line digital holography [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(15): 3228–3230.
- Xue Kai, Li Qi, Wang Qi. Wavelet-based autofocus algorithm for terahertz digital holographic imaging [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(s1): s111005.
- 薛凯, 李琦, 王骥. 基于小波变换的太赫兹数字全息成像自动聚焦算法 [J]. *中国激光*, 2012, 39(s1): s111005.
- S Yu, S Duthaler, B J Nelson. Autofocusing in computer microscopy: selecting the optimal focus algorithm [J]. *Microscopy Research and Technique*, 2004, 65(3): 139–149.
- P Langehanenberg, B Kemper, D Dieter, *et al.*. Autofocusing in digital holographic phase contrast microscopy on pure phase objects for live cell imaging [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(19): D176–D182.
- F Dubois, C Schokaert, N Callens, *et al.*. Focus plane detection criteria in digital holography microscopy by amplitude analysis [J]. *Opt Express*, 2006, 14(13): 5895–5098.
- M Liebling, M Unser. Autofocus for digital Fresnel holograms by use of a Fresnel-sparsity criterion [J]. *J Opt Soc Am A*, 2004, 21(12): 2424–2430.
- Wang Huaying, Liu Jingbo, Wang Dayong, *et al.*. Autofocus for numerical reconstruction in digital holographic microscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(s2): 343–347.
- 王华英, 刘景波, 王大勇, 等. 显微数字全息数值再现中的自动聚焦 [J]. *光学学报*, 2008, 28(s2): 343–347.

11 Zhai Yongping, Zhou Dongxiang, Liu Yunhui, *et al.*. Design of evaluation index for auto-focusing function and optimal function selection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0418002.  
翟永平, 周东翔, 刘云辉, 等. 聚焦函数性能评价指标设计及最优函数选取 [J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0418002.

12 Li Qi, Hu Jiaqi. Experimental investigation on recording distance of terahertz gabor in-line digital holography [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209020.  
李 琦, 胡佳琦. 太赫兹伽栢同轴数字全息记录距离实验研究 [J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209020.

栏目编辑: 何卓铭