

# 基于小波变换的太赫兹数字全息成像自动聚焦算法

薛凯 李琦 王琪

(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 150081)

**摘要** 自动聚焦技术是实现数字全息成像快速、准确再现的关键技术之一。在分析聚焦和离焦过程中小波变换高频和低频系数变化特点的基础上,提出了一种基于小波变换的聚焦判据函数。采用无噪声和被噪声污染的模拟太赫兹(THz)数字全息图,比较分析了这种聚焦判据函数和五种经典的数字全息聚焦判据函数的性能,给出了综合评价。仿真结果表明:同五种经典聚焦判据函数相比,基于小波变换的聚焦评价函数具有更好的单峰性、更高的主峰锐度和极佳的抗噪性,是一种性能优越的 THz 数字全息成像自动聚焦判据函数。

**关键词** 数字全息;聚焦函数;自动聚焦;小波变换

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.s111005

## Wavelet-Based Autofocus Algorithm for Terahertz Digital Holographic Imaging

Xue Kai Li Qi Wang Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology,  
Harbin, Heilongjiang 150081, China)

**Abstract** Autofocus technique is one of the key techniques in digital hologram, which can achieve fast imagine capture and accurate reconstruction. A new wavelet-based autofocus algorithm for terahertz (THz) digital holographic imaging is proposed based on the analysis of focus and defocus characteristics, which mainly concentrates on coefficient of high frequency and low frequency wavelet transform. The new autofocus algorithm of this focus measure is compared with five classic digital hologram autofocus algorithms according to the THz image with and without noise, also comments are attached. The analysis and comparison of the simulation show that the new wavelet-based autofocus algorithm has the following features: a better unimodality, a fineness sharpness and a stronger performance of anti-noise.

**Key words** digital holography; focus algorithm; autofocusing; wavelet transform

**OCIS codes** 090.1995; 090.2880; 110.3010; 120.6650

## 1 引 言

数字全息成像是一种新的全息成像技术,广泛应用于粒子场检测、显微数字全息成像、信息加密等方面,是国际研究的前沿领域之一<sup>[1~5]</sup>。太赫兹(THz)数字全息成像是 THz 技术与数字全息成像技术的结合,是当今 THz 成像技术的前沿之一。迄今为止,公开发表的关于 THz 数字全息成像的报道较少,只有英国<sup>[6~8]</sup>、俄罗斯<sup>[9~12]</sup>、美国<sup>[13]</sup>及中国哈尔滨工业大学<sup>[14]</sup>、首都师范大学<sup>[15]</sup>的研究团队有过

相关的成果报道。

由于 THz 波长较可见光波长长,且 THz 波段的探测器像元尺寸较大,一般 THz 数字全息成像的记录距离都比较近,因此记录距离的准确测量变得十分重要,如何快速、准确地确定聚焦像面的位置是 THz 数字全息成像的一个关键问题。传统的方法是根据测量的记录距离不断尝试来确定的,而自动聚焦技术只需知道大致的记录距离就可利用聚焦算法自动寻找最佳再现距离,降低了对实际记录距离

**收稿日期:** 2012-01-05; **收到修改稿日期:** 2012-02-15

**基金项目:** 高等学校博士学科点专项科研基金(20112302110028)资助课题。

**作者简介:** 薛凯(1985—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹数字全息方面的研究。E-mail: hit\_xuekai@163.com

**导师简介:** 李琦(1963—),女,博士,教授,主要从事激光雷达与太赫兹成像等方面的研究。

E-mail: hit\_liqi@yahoo.cn

测量精度的要求,有利于提高 THz 数字全息再现像的质量。

THz 数字全息成像的特点决定了自动聚焦技术是确定再现距离的最佳方法,而选取适当的聚焦判据函数是自动聚焦技术的关键。近年来,国内外学者提出了许多新的聚焦判据函数<sup>[16-19]</sup>,然而这些聚焦判据函数大部分被应用于光学显微成像及可见光数字全息成像领域,对可应用于 THz 数字全息成像的聚焦判据函数的研究未见报道。

本文提出了基于 sym4 正交小波基的可应用于 THz 数字全息成像的小波变换聚焦判据函数(WTA),通过数值仿真比较分析了聚焦判据函数与五种经典数字全息成像聚焦判据函数的性能,给出了综合评价。实验结果表明,基于小波变换的聚焦判据函数运算时间相对较长,但其具有更好的单峰性、更高的主峰锐度、较大的极值落差和极佳的抗噪性能。

## 2 数字全息成像记录及数字再现

数字全息成像简化光路如图 1 所示,  $x_0$ - $y_0$  平面,  $x_H$ - $y_H$  平面,  $x_1$ - $y_1$  平面分别代表物平面、记录面和再现像面。经物体透射的光场传播到记录面,与引入的参考光干涉,记录面上的光场强度可表示为

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

式中  $O(x_H, y_H)$  与  $R(x_H, y_H)$  分别代表物光和参考光在记录面上的复振幅分布。

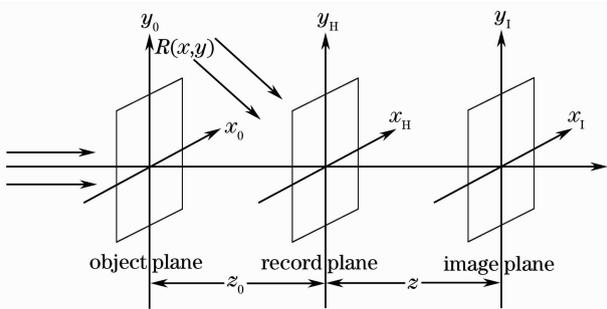


图 1 数字全息成像示意图

Fig. 1 Schematic for digital hologram imaging

利用频谱滤波或相移技术,可以从(1)式中提取出物光在记录面上的复振幅分布  $O(x_H, y_H)$ ,采用角谱算法再现的像面光场分布  $O(x_1, y_1)$ 可表示为

$$O(x_1, y_1) = \mathcal{F}^{-1} \{ \exp[ikz\sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}] \times \mathcal{F}[O(x_H, y_H)] \}, \quad (2)$$

式中  $f_x$  与  $f_y$  分别代表  $x$  和  $y$  方向上的空间频率,  $z$  为再现距离,  $\lambda$  为使用的激光波长,  $\mathcal{F}$  与  $\mathcal{F}^{-1}$  分别表示傅里叶变换及逆变换。

## 3 经典数字全息成像的自动聚焦函数

准确有效的图像清晰度评价函数是数字全息成像实现自动聚焦的关键。在数字全息成像中,再现像的清晰度反映了系统的离焦、聚焦程度。当图像聚焦准确时,图像细节清晰。

常用的数字全息成像聚焦判据函数包括 Tenenbaum 梯度判据函数(TEG)、Prewitt 梯度判据函数(PRG)、标准偏差相关判据函数(STD)、归一化方差判据函数(NOA)和改进的拉普拉斯判据函数(SML)。

### 3.1 Tenenbaum 梯度判据函数

Tenenbaum 梯度判据函数的依据是图像像质越高,含有的高频成分越丰富。高频成分对应着图像的边缘,高频成分越丰富,图像边缘越锐利。通过提取这些边缘,对这些边缘求和所得的值在图像像质越好时应该越大。

它采用  $3 \times 3$  的 Sobel 算子与图像卷积来估计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,边缘能量就越大。为了加强边缘的作用,对梯度进行平方运算,其表达式为<sup>[20]</sup>

$$F_{\text{TEG}} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_x^2(i, j) + I_y^2(i, j)], \quad (3)$$

式中

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

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

离焦再现像强度的  $F_{\text{TEG}}$  值小于聚焦再现像强度的  $F_{\text{TEG}}$  值,即  $F_{\text{TEG}}$  的最大值对应于聚焦像。

### 3.2 Prewitt 梯度判据函数

Prewitt 梯度判据函数的依据与 Tenenbaum 梯度判据函数相同,即图像像质越好,含有的高频成分越丰富,图像边缘越锐利。在数字图像处理中,可使用 Prewitt 算子与图像卷积提取出图像的边缘。Prewitt 算子与 Sobel 算子非常类似,只是模板系数不同。

PRG 通过图像与 Prewitt 算子卷积, 计算一阶偏导数, 将卷积结果取平方再求和, 即<sup>[20]</sup>:

$$F_{\text{PRG}} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_x^2(i, j) + I_y^2(i, j)], \quad (4)$$

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

$$\begin{aligned} I_x(i, j) &= [I(i+1, j-1) + I(i+1, j) + \\ & I(i+1, j+1) - I(i-1, j-1) - \\ & I(i-1, j) - I(i-1, j+1)], \\ I_y(i, j) &= [I(i-1, j+1) + I(i, j+1) + \\ & I(i+1, j+1) - I(i-1, j-1) - \\ & I(i, j-1) - I(i+1, j-1)]. \end{aligned}$$

### 3.3 标准偏差相关判据函数

标准偏差相关判据函数是一种基于再现像强度统计的判据函数, 利用相关来作为评价再现像清晰度的函数, 其表达式为<sup>[16]</sup>

$$F_{\text{STD}} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i+1, j)I(i, j)] - MN\bar{I}^2, \quad (5)$$

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  $\bar{I} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(i, j)$ .

### 3.4 归一化方差判据函数

归一化方差判据函数计算出再现像强度值的方差, 并对强度值方差除以再现像的平均强度进行归一化<sup>[16]</sup>. 这种判据函数可以有效地补偿不同再现像平均强度之间的差异.

$$F_{\text{NOA}} = \frac{1}{MN\bar{I}} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i, j) - \bar{I}]^2, \quad (6)$$

式中  $I(i, j)$  和  $\bar{I}$  分别表示像素点  $(i, j)$  对应的强度

值和整幅图像的强度均值.

### 3.5 SML 函数判据

SML 判据函数是在拉普拉斯算子的基础上进行改进获得的, 其计算水平和垂直方向的二阶差分绝对值和的平方. 这种判据函数具有较好的抗噪性能, 在很多自动聚焦系统中获得了广泛的应用, 其判据函数表达式为<sup>[21]</sup>

$$F_{\text{SML}} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_x(i, j) + I_y(i, j)]^2, \quad (7)$$

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

$$\begin{aligned} I_x(i, j) &= |2I(i, j) - I(i-1, j) - I(i+1, j)|, \\ I_y(i, j) &= |2I(i, j) - I(i, j-1) - I(i, j+1)|. \end{aligned}$$

## 4 基于小波变换的聚焦判据函数

小波变换聚焦判据函数的依据是图像越清晰高频分量越丰富, 图像越模糊高频分量越少. 在离焦的过程中, 随着图像的模糊、越来越平滑, 低频段能量逐渐增加, 而高频段能量逐渐减少. 而正交小波变换能量不变, 因此小波分解系数也呈相应的变化趋势, 即当图像最清晰时, 小波分解后的高频系数最大, 随着图像的逐渐模糊, 高频系数逐渐变小、低频系数逐渐增加.

黑白格图像的小波二级分解如图 2 所示, 从小波分解后的图像中可以清晰地看出每个频带所提取的相应的原始图像边缘细节. 由图 2 可知, 图像的高频能量主要由第一和第二层小波分解高频系数决定. 层数越高, 其高频系数代表越微小的图像细节.

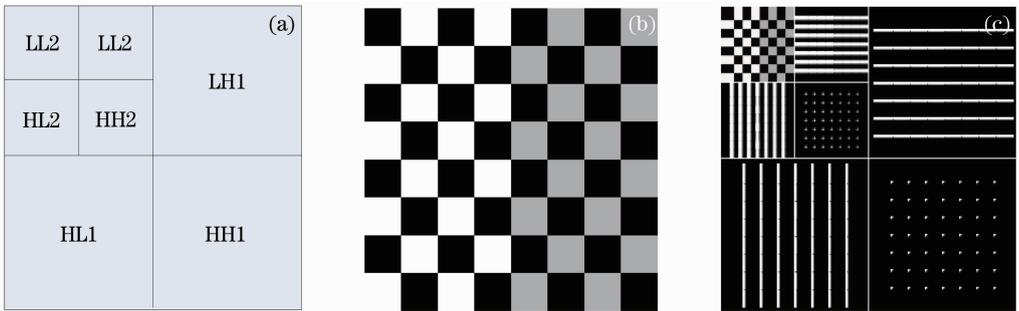


图 2 黑白格图像的小波分解示意图. (a)小波分解; (b)黑白格图像; (c)黑白格图像的小波分解

Fig. 2 Schematic for wavelet transform of the black-white grid image. (a) Wavelet transform; (b) black-white grid image; (c) wavelet transform of the black-white grid image

2003 年, G. Yang 等<sup>[22]</sup>提出了两种使用 db 类小波分解的应用于光学显微成像的自动聚焦判据函数, 其是基于图像越清晰, 高频成分越丰富, 图像边缘越锐利, 则小波分解后的高频系数越大, 两种聚焦判据函数的表达式为

$$F_{\text{W1}} = \frac{1}{MN} \sum_{\text{Height}} \sum_{\text{Width}} [|W_{\text{HL}}(i, j)| + |W_{\text{LH}}(i, j)| + |W_{\text{HH}}(i, j)|], \quad (8)$$

$$F_{W_2} = \frac{1}{MN} \sum_{\text{Height}} \sum_{\text{Width}} \{ [ |W_{HL}(i,j) - \mu_{HL}|^2 + [ |W_{LH}(i,j)|^2 - \mu_{LH}]^2 + [ |W_{HH}(i,j) - \mu_{HH}|^2 ] \}. \quad (9)$$

本文综合考虑聚焦、离焦过程中图像的高频和低频分量变化及小波分解高频和低频系数的变化特点,提出了一种适用于 THz 数字全息成像的基于 sym4 正交小波基的小波变换聚焦判据函数,该聚焦判据函数定义为

$$W = \frac{W_{IH}^2}{W_{IL}^2}, \quad (10)$$

式中

$$W_{IL}^2 = \frac{1}{MN} \sum_{(i,j) \in E_{IL}} [W_{IL}(i,j) - \mu_{IL}]^2, \quad (11)$$

$$W_{IH}^2 = \frac{1}{MN} \left\{ \sum_{(i,j) \in E_{ILH}} [W_{ILH}(i,j) - \mu_{ILH}]^2 + \sum_{(i,j) \in E_{IHL}} [W_{IHL}(i,j) - \mu_{IHL}]^2 + \sum_{(i,j) \in E_{IHH}} [W_{IHH}(i,j) - \mu_{IHH}]^2 \right\}, \quad (12)$$

式中  $E_{IL}$ 、 $E_{ILH}$ 、 $E_{IHL}$  和  $E_{IHH}$  分别代表分解层为  $I$  的低频段、高频段的分解窗口,  $W_{IL}(i,j)$ 、 $W_{ILH}(i,j)$ 、 $W_{IHL}(i,j)$ 、 $W_{IHH}(i,j)$  分别代表相应的  $I$  层低频、高

频系数,  $\mu$  代表相应低频、高频窗口内系数的均值。

## 5 数值仿真实验及分析

为检验基于小波变换的聚焦判据函数的有效性,将 WTA 与经典的数字全息成像聚焦判据函数: TEG、PRG、STD、NOA、SML 进行对比研究。从偏差、单峰性、主峰锐度抗噪性和运算时间五个方面<sup>[16]</sup>对六种聚焦判据函数进行综合评价。

THz 数字全息成像的数值仿真模拟参量:  $M_x = M_y = 512$ ,  $\Delta x = \Delta y = 0.1 \text{ mm}$ ,  $\lambda = 118.83 \text{ } \mu\text{m}$ , 采用同轴相移光路依次记录 4 张全息图,相邻全息图的平面参考光波相位相差  $\pi/2$ ,记录物体为 Baboon 标准数字图像。

模拟记录的平面物体如图 3(a)所示,距离 CCD 记录面的距离为 90 mm,因此最佳再现像对应的再现距离为 90 mm。图 3(b)是 4 张同轴相移全息图中的 1 张,应用标准四步相移算法得到的 CCD 记录面上的物光波前光强分布,如图 3(c)所示。

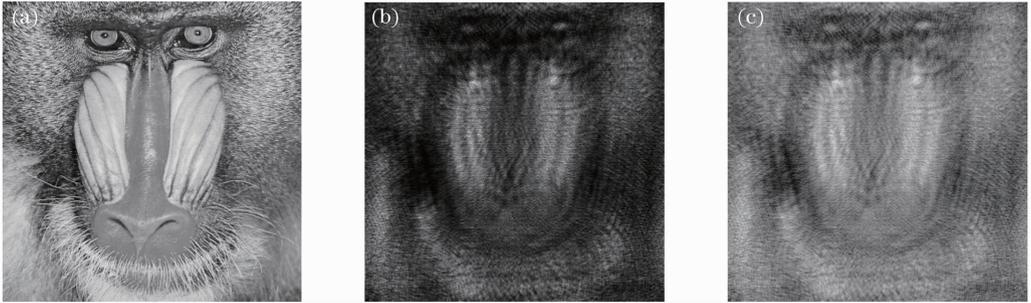


图 3 数值仿真数据。(a)模拟物体的强度图像; (b)全息图; (c)提取的记录面物光场强度分布

Fig. 3 Data used in simulation. (a) Intensity image of the simulated target; (b) one hologram;

(c) intensity distribution of the object wave on record plane

### 5.1 聚焦判据函数的聚焦性能比较

图 4 给出了 CCD 记录面上再现物光复振幅场不含噪声情况下,聚焦判据函数随再现距离  $z$  的变化曲线。为了便于几种聚焦判据函数性能的比较,对各聚焦判据函数曲线均做了归一化处理,且再现距离  $z$  变化步长为 0.1 mm。

由图 4 所示的聚焦曲线可以看出,六种算法均实现了准确、无偏差的自动聚焦,即再现距离  $z = 90 \text{ mm}$ 。六种聚焦曲线均具有较好的单峰性,但 TEG、PRG、SML、WTA 比 STD、NOA 的聚焦曲线主峰更加锐利、灵敏度更高。TEG、PRG、SML、WTA 四种聚焦判据函数的性能相差不大,均实现

了准确、无误差的快速聚焦,且在最佳再现距离附近聚焦曲线变化陡峭,极值点明显;但 STD 和 NOA 聚焦曲线变化比较缓慢、落差小,极值点相对不明显。

### 5.2 聚焦判据函数的抗噪性能比较

为了研究记录时引入噪声对聚焦判据函数自动聚焦性能的影响,在再现复振幅场的实部和虚部分别都加入高斯噪声、椒盐噪声和泊松噪声。图 5(b)~(d)分别显示图 3(c)所示记录面再现复振幅场受高斯噪声(均值为 0、方差为 0.02)、椒盐噪声(噪声密度 0.05)和泊松噪声污染的光场强度分布。图 6(a)为未加噪声时再现距离为 90 mm 时的再现

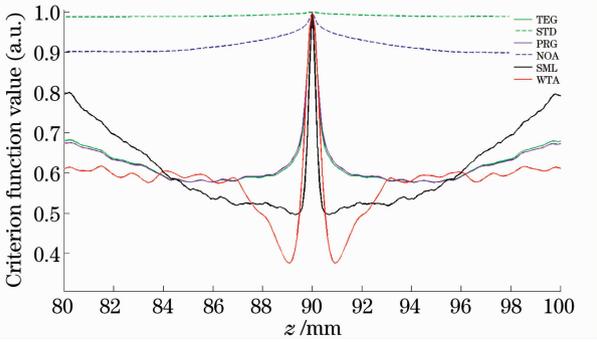


图 4 物光场未加噪声时, 聚焦判据函数随再现距离的变化曲线

Fig. 4 Curves of criteria functions dependent on  $z$  when the object wave is without noises

像, 图 6(b)~(d) 分别为受高斯噪声、椒盐噪声和泊松噪声污染时再现距离为 90 mm 的再现像。

由图 5、6 可知, 若数字全息记录过程中受到噪声的影响, 将导致再现像像质严重下降。因此, 必须对各种聚焦判据函数的抗噪声性能进行研究, 分析其实际应用的可行性。

为了详细分析全息图记录过程中加入噪声对自动聚焦判据函数性能的影响, 对加入噪声后的记录面再现复振幅物光场进行了聚焦性能测试。图 7 给出了 CCD 记录面再现复振幅场加入噪声情况下, 聚焦判据函数随再现距离  $z$  的变化曲线。其中, 图 7(a) 是未受噪声污染时的聚焦曲线, 图 7(b) 是加入高斯噪声时的聚焦曲线, 图 7(c) 是加入椒盐噪声时的聚焦曲线, 图 7(d) 是加入泊松噪声时的聚焦曲线。为了便于聚焦判据函数性能的比较, 对各聚焦判据函数曲线也均做了归一化处理, 且再现距离  $z$  变化步长为 0.1 mm。

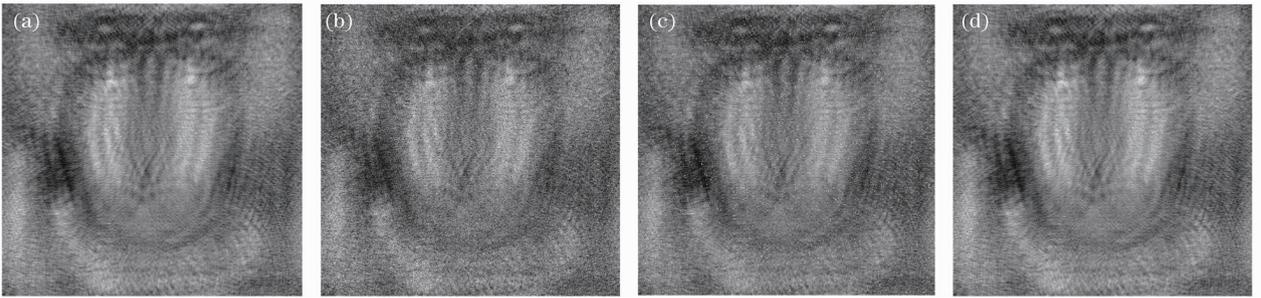


图 5 记录面未加噪声和加不同噪声后的物光场强度分布。(a) 无噪声; (b) 高斯噪声; (c) 椒盐噪声; (d) 泊松噪声

Fig. 5 Intensity distribution without and with noises on record plane. (a) Without noise; (b) Gaussian noise; (c) salt and pepper noise; (d) Poisson noise

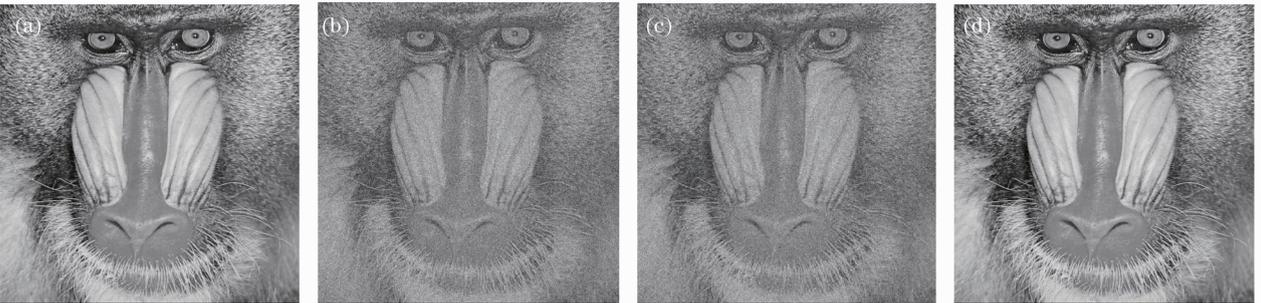


图 6 记录面未加噪声及加入不同噪声时, 再现距离  $z=90$  mm 处的再现像。(a) 无噪声; (b) 高斯噪声; (c) 椒盐噪声; (d) 泊松噪声

Fig. 6 Reconstruction images from the object wave on record plane without and with noises when  $z=90$  mm. (a) Without noise; (b) Gaussian noise; (c) salt and pepper noise; (d) Poisson noise

由图 7 所示的聚焦曲线可知, 对于加入噪声的情况, 各种聚焦判据函数的聚焦曲线均出现了不同程度的变化, 而且 SML、NOA 在聚焦过程中出现了微小的聚焦偏差。TEG、PRG、SML、NOA 聚焦曲线中出现了较多的次级峰, SML、NOA 的次级峰值达到了 0.95 以上, 同主峰值相差不大, 即落差小。TEG、PRG 的聚焦曲线也出现了变化较小的次级

峰, 但次级峰值也达到了 0.92 以上。相对而言, TEG、PRG 的抗噪性能优于 STD、SML、NOA, 是较好的聚焦判据函数。

基于 sym4 正交小波基的小波变换聚焦判据函数在未加噪声及加入不同种类噪声情况下, 均表现出优越的性能。相对于其他五种聚焦判据函数, WTA 的聚焦曲线更加平滑、主峰更加锐利、极值点

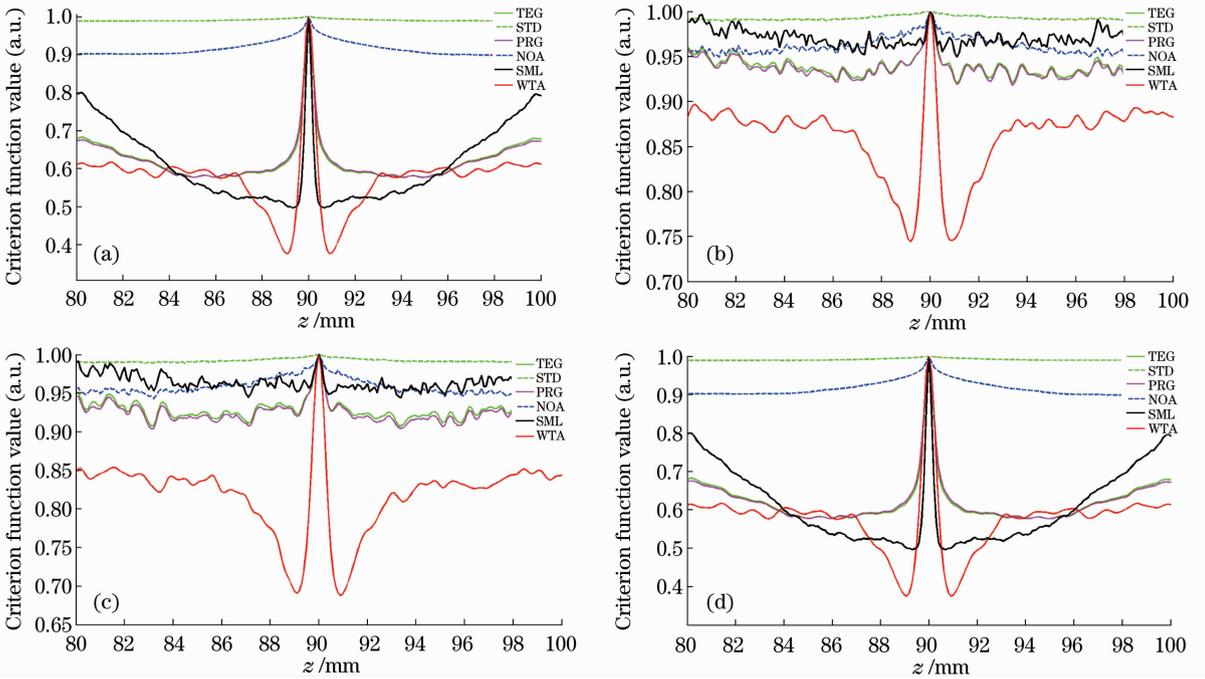


图7 记录面物光场未加噪声及加不同噪声时,判据函数随再现距离的变化曲线。(a)无噪声;(b)高斯噪声;(c)椒盐噪声;(d)泊松噪声

Fig. 7 Curves of criteria functions dependent on  $z$  when the object wave on record plane is without and with noises. (a) Without noise; (b) Gaussian noise; (c) salt and pepper noise; (d) Poisson noise

落差大、精确度更高。WTA 聚焦曲线中出现了微小次级峰,但远小于主峰值,相对于整体聚焦曲线而言可以忽略。

### 5.3 聚焦判据函数运算时间比较

运算时间是指运行一次对焦程序所需的时间,是考察聚焦判据函数性能的一个方面。对中心再现距离  $z=90$  mm,再现距离变化步长为0.1 mm,记录面物光场未加噪声及加不同噪声(高斯噪声:均值为0、方差为0.05,椒盐噪声:噪声密度0.05)时的200幅  $512 \times 512$  大小的再现复振幅物光场进行了时间性能测试,测试结果如表1所示。

表1 记录面物光场未加噪声及加不同噪声时判据函数运算时间测量值

Table 1 Quantitative appraisal of criteria functions computation time when the object wave on record plane is without and with noises

Criteria functions	Computation time /s			
	Without noise	Gaussian noise	Salt and pepper noise	Poisson noise
TEG	12.56	12.66	12.63	12.52
STD	10.24	10.34	10.34	10.31
PRG	12.57	12.61	12.55	12.42
NOA	10.08	10.09	10.05	10.05
SML	13.45	13.46	13.45	13.40
WTA	18.82	18.90	18.92	18.82

五种经典的聚焦判据函数只是对再现图像进行简单的差分、乘积及求和运算,相对简单、运算量小、运算时间短,但由于没有考虑周围点的变化,容易受噪声影响而导致错误聚焦;而本文提出的 WTA 算法需要对再现图像整体进行小波分解、求均值及方差,其运算量较大、运算时间相对较长,但其考虑了再现图像整体的性能,具有极大的极值落差和极佳的抗噪性能,在实际的应用中具有更广阔的前景。

WTA 相对于其他五种经典聚焦判据函数,运算时间相对较长,但具有更好的单峰性、更高的主峰锐度和极佳的抗噪性能,综合考虑 WTA 是一种性能优越的 THz 数字全息成像自动聚焦判据函数。同时,对可见光波段的数字全息成像自动聚焦仿真研究发现,本文算法依然表现出相同的性能,因此本文算法可应用于可见光数字全息成像的自动聚焦。

## 6 结 论

提出了一种基于 sym4 正交小波基的小波变换聚焦判据函数。将聚焦判据函数和五种经典的聚焦函数,在 THz 数字全息成像中进行了系统地研究。数值仿真模拟实验结果表明,在无噪声的情况下,六种聚焦判据函数均实现了准确、无偏差的自动聚焦,表现出较好的性能,且 TEG、PRG、SML、WTA 比

STD、NOA 的聚焦曲线主峰更加锐利、灵敏度更高。在加入噪声后,其他五种聚焦判据函数均出现了性能的劣化,出现较多的次级峰、落差较小;但本文提出的聚焦判据函数依然具有较好的单峰性、较高的主峰锐度和极大的极值落差,表现出极佳的抗噪性能。本文提出的 WTA 算法由于其考虑了再现图像整体的性能,运算量较大、运算时间相对较长,但其具有极大的极值落差和极佳的抗噪性能,在实际的应用中具有更广阔的前景。因此,本文提出的基于小波变换的聚焦判据函数是一种应用于 THz 数字全息成像的优秀聚焦判据函数,仿真研究发现聚焦判据函数也可应用于可见光数字全息成像的自动聚焦,具有广阔的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 B. Kemper, G. Bally. Digital holographic microscopy for live cell applications and technical inspection[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(4): A52~A61
- 2 Huaying Wang, Dayong Wang, Jie Zhao *et al.*. Simple and robust digital holography for high-resolution imaging[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(3): 165~167
- 3 Wang Huaying, Wang Guangjun, Zhao Jie *et al.*. Imaging resolution analysis of digital holographic microscopy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1670~1674  
王华英,王广俊,赵洁等.数字全息显微系统的成像分辨率分析[J].*中国激光*, 2007, **34**(12): 1670~1674
- 4 X. F. Meng, L. Z. Cai, X. F. Xu *et al.*. Two-step phase-shifting interferometry and its application in image encryption[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(10): 1414~1416
- 5 Pan Feng, Xiao Wen, Liu Shuo. Digital holographic microscopy for long-term quantitative phase-contrast imaging of living cells[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0509001  
潘锋,肖文,刘烁.一种适用于长期定量观察生物活细胞的数字全息显微方法[J].*中国激光*, 2011, **38**(5): 0509001
- 6 J. Mahon Ronan, J. Anthony Murphy, William Lanigan. Digital holography at millimetre wavelengths[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **260**(2): 469~473
- 7 J. Mahon Ronan, J. Anthony Murphy, William Lanigan. Terahertz holographic image reconstruction and analysis[C]. 29th Int. Conf. on Infrared and Millimeter, 2004. 749~750
- 8 I. McAuley, J. A. Murphy, N. Trappe *et al.*. Applications of holography in the millimeter-wave and terahertz region[C]. *SPIE*, 2011, **7938**: 79380H
- 9 V. P. Bolotin, V. S. Cherkassky, E. N. Chesnokov *et al.*. Novosibirsk terahertz free electron laser: status and survey of experimental results[C]. 2005 Joint 30th Intl. Conf. on Infrared and Millimeter Waves & 13th Intl. Conf. on Terahertz Electronics, 2005, **2**: 495~496
- 10 V. S. Cherkassky, B. A. Knyazev, S. V. Kozlov *et al.*. Terahertz imaging and holography with a high-power free electron laser[C]. 2005 Joint 30th Intl. Conf. on Infrared and Millimeter Waves & 13th Intl. Conf. on Terahertz Electronics, 2005, **2**: 337~338
- 11 B. A. Knyazev, A. L. Balandin, V. S. Cherkassky *et al.*. Classic holography, tomography and speckle metrology using a high-power terahertz free electron laser and real-time image detectors[C]. 2010 35th International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves(IRMMW-THz), 2010. 1~3
- 12 B. A. Knyazev, G. N. Kulipanov, N. A. Vinokurov. Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, **21**(0504017): 1~13
- 13 S. Heimbeck, Martin, K. Kim, Myung, D. A. Gregory *et al.*. Terahertz digital holography using angular spectrum and dual wavelength reconstruction methods[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(10): 9192~9200
- 14 Ding Shenghui, Li Q., Li Y. D. *et al.*. Continuous-wave terahertz digital holography by use of a pyroelectric array camera[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(11): 1993~1995
- 15 Y. Zhang, W. Zhou, X. Wang *et al.*. Terahertz digital holography[J]. *Strain*, 2008, **44**(5): 380~385
- 16 S. Yu, S. Duthaler, B. J. Nelson *et al.*. Autofocusing in computer microscopy: selecting the optimal focus algorithm[J]. *Microscopy Research and Technique*, 2004, **65**(3): 139~149
- 17 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): 5895~5908
- 18 P. Langehanenberg, B. Kemper, D. Dirksen *et al.*. Autofocusing in digital holographic phase contrast microscopy on pure phase objects for life cell imaging[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(19): D176~D185
- 19 M. Liebling, Michael Unser. Autofocus for digital Fresnel holograms by use of a Fresnel-sparsity criterion[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2004, **21**(12): 2424~2430
- 20 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
- 21 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
- 22 G. Yang, B. J. Nelson. Wavelet-based auto-focusing and unsupervised segmentation of microscopic images[C]. Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003. 2143~2148