

# 相位解调技术在浑浊介质成像中的应用

周利斌<sup>1,2</sup> 杜新超<sup>3</sup> 贺正权<sup>3\*</sup> 孙浩<sup>1</sup> 袁柳通<sup>1</sup> 张晓蕾<sup>1</sup> 忽满利<sup>1</sup> 李育林<sup>3</sup>

<sup>1</sup>西北大学物理学院, 陕西 西安 710069; <sup>2</sup>陕西科技大学理学院, 陕西 西安 710021

<sup>3</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

**摘要** 浑浊介质引起的多光散射会使扭曲光波传播, 使图像变得模糊。浑浊透镜成像(TLI)则可以重建这种被扭曲的图像。在该方法中, 需要提取输出光场的复电场(复振幅)信息, 以计算浑浊介质的传输矩阵。但是 CCD 记录的是图像的强度信息, 丢失了扭曲光场的相位信息。由于物光经过浑浊介质后变成了强度剧烈变化的散斑图像, 直接进行相位解调会产生较大误差。为了消除散斑强度变化的影响, 分别记录扭曲光场图像、参考光图像、干涉条纹图像和背景光图像。根据对应关系换算出干涉余弦因子, 对余弦因子应用希尔伯特变换进行相位解调就可以比较准确地计算出散斑的相位。通过上述方法成功地计算出扭曲图像的复电场及浑浊介质的传输矩阵。由于对振幅的测量采用直接方法, 因而对于散斑干涉条纹来说, 该方法的计算结果更加准确。

**关键词** 成像系统; 相位解调; 希尔伯特变换; 浑浊介质成像

**中图分类号** O438.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.s111005

## Application of Phase Demodulation Technique in Turbid Medium Imaging

Zhou Libin<sup>1,2</sup> Du Xinchao<sup>3</sup> He Zhengquan<sup>3</sup> Sun Hao<sup>1</sup> Yuan Liutong<sup>1</sup>  
Zhang Xiaolei<sup>1</sup> Hu Manli<sup>1</sup> Li Yulin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>College of Physics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China

<sup>2</sup>College of Science, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710021, China

<sup>3</sup>Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

**Abstract** Multiple light scattering caused by turbid medium can distort the propagation of waves, thus the image will become blurred. A novel method called turbid lens imaging (TLI) is adopted to reconstruct this kind of distorted images. In this method, the complex electric field of output light needs to be obtained to calculate transfer matrix of turbid medium. Only the intensity information is recorded by CCD, the phase information will be merged in recorded images. As speckle images are generated when the incident light transmits through turbid medium, there will be obvious error in the phase retrieved by using Hilbert transform directly on the interference fringe pattern. In order to eliminate the influence of speckle intensity changes, the distorted wave image, reference beam image, light interference fringe image and background image are recorded respectively. According to the interference theory, interference cosine factor can be computed, and it will retrieve phase of distorted waves more accurately by using Hilbert transform on cosine factor. In the above method, the complex electric field of distorted wave and the transfer matrix of the turbid medium are successfully calculated. It is more accurate as the amplitude is measured directly. For speckle fringe, the calculation results are much more accurate than the Hilbert transform phase demodulation results.

**Key words** imaging system; phase demodulation; Hilbert transform; imaging through turbid media

**OCIS codes** 110.0113; 030.6140; 100.5070; 100.3010

**收稿日期:** 2015-01-22; **收到修改稿日期:** 2015-03-02

**基金项目:** 国家自然科学基金(61377087, 61275086)

**作者简介:** 周利斌(1983—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事信息光学方面的研究。E-mail: zhouzhulibin@sohu.com

**导师简介:** 忽满利(1959—), 男, 博士, 教授, 主要从事信息光学和光电检测技术方面的研究。E-mail: huml@nwu.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: zhqhe@opt.ac.cn

## 1 引言

近年来报道了大量关于光经过散射介质传播以实现更好的成像或提高衍射极限的研究<sup>[1-6]</sup>。一方面,光通过散射介质后引起波前的扭曲,导致光学系统成像质量降低<sup>[7]</sup>。另一方面,散射介质引起的扭曲可以用来操控波前以会聚光来达到更好的成像<sup>[8]</sup>。因此,许多有趣的研究都尝试克服浑浊介质导致的光散射效应,同时也对多重散射加以利用。例如,已经证明对于合适的人射光形貌,通过浑浊介质可以将光束会聚得比衍射极限还要细锐<sup>[5]</sup>。

由于浑浊介质的多重散射,物体的图像被严重扭曲,使得通过浑浊介质发送信息一般是不可能的。然而,如果浑浊介质中的传输特性被标定,例如通过确定其传输矩阵(TM),利用图像扭曲和传输矩阵之间的确定关系,可以消除图像的扭曲。因此,浑浊介质不再是成像的障碍,而是像透镜一样有用的光学元件;此外,它比传统的光学元件具有更多的优势<sup>[9-12]</sup>。

传输矩阵描述的是浑浊介质的输入-输出响应,这是入射波和散射波之间的关系,以振幅和相位分布来描述。入射光通过浑浊介质传输后会产生散斑图像。CCD记录的只是图像的强度信息,相位信息被隐含在记录的图像中<sup>[12-13]</sup>,找到一种有效的方法来提取相位信息是非常关键的。

获得相位信息的方法之一是通过引入一个参考光束,使散射光与参考光束之间干涉产生干涉条纹;通过对干涉条纹图案做希尔伯特变换可以提取散射光的振幅和相位信息<sup>[14-17]</sup>。考虑到散射场的振幅急剧变化,而希尔伯特变换提取相位仅在干涉图案由两个均匀的光束产生时是有效的。根据计算结果,在这种情况下,直接对干涉条纹使用希尔伯特变换提取相位信息将产生显著的误差。

本文使用了一种称为浑浊透镜成像(TLI)的方法,通过使用干涉显微镜记录介质的传输矩阵<sup>[9,11-12]</sup>,提出了一种有效的方法从散斑图像中获取幅度和相位信息,可以大大提高计算结果的准确性。

## 2 浑浊介质成像原理

当一个物体放在图1中的物面上,并用沿Z轴传播的平面波照明,光波的波前会受到物体的调制,透射光将载有物体的信息。在物面(OP)位置的透射光波可以展开为一组不同传播方向的平面波,如图1所示。OP处物光的复电场 $E_{OP}(\xi, \eta)$ 可以表示为

$$E_{OP}(\xi, \eta) = \sum_{k_\xi, k_\eta} A(k_\xi, k_\eta) \exp[i(k_\xi \xi + k_\eta \eta)], \quad (1)$$

式中 $A(k_\xi, k_\eta)$ 是每个平面波的复数展开系数, $k_\xi$ 和 $k_\eta$ 是对应的波矢量。 $A(k_\xi, k_\eta)$ 的集合称为物光波的角谱<sup>[12]</sup>。

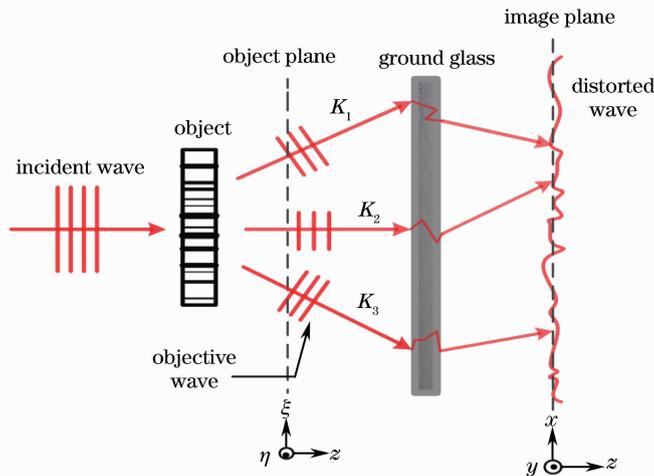


图1 物光通过浑浊介质的传播过程。物光包括多个角度的平面波,由于浑浊介质的散射,散射波是一个扭曲的图像  
Fig.1 Object wave propagation through turbid medium. Object wave is composed of multiple angular plane waves and scattered wave is a distorted image due to the turbid medium

研究表明在像面(IP)处扭曲后的物体像的光波 $E_{IP}(x, y)$ 也可以描述成OP处各种平面波经过系统扭曲后的结果的叠加。透过浑浊介质扭曲后的物体的像 $E_{IP}(x, y)$ 可以写为

$$E_{IP}(x, y) = \sum_{k_\xi, k_\eta} A(k_\xi, k_\eta) E_i(x, y; k_\xi, k_\eta). \quad (2)$$

平面波扭曲后的光场  $E_i(x, y; k_\xi, k_\eta)$  的集合可以描述系统输出与输入的响应,通常是复数散斑图样。因此被称为浑浊介质的传输矩阵<sup>[9-10]</sup>。

为了得到原始物体的像  $E_{OP}$ , 必须从扭曲的像  $E_{IP}$  中计算出物体的角谱。为了达到这一目标,用传输矩阵中的一个矩阵单元  $E_i(x, y; k_\xi, k_\eta)$  对  $E_{IP}(x, y)$  进行投影。投影运算可以表示为

$$\langle E_i^*(x, y; k_\xi, k_\eta) E_{IP}(x, y) \rangle_{x, y} = A(k_\xi, k_\eta), \quad (3)$$

式中  $E_i^*$  为传输矩阵单元  $E_i$  的复共轭,  $\langle \cdot \rangle_{x, y}$  为对整个像面的空间平均。

另外,实验已经证明传输矩阵单元之间是正交的<sup>[9]</sup>。如果对所有传输矩阵单元都进行投影计算,就可以得到物体图像的角谱,角谱元素的个数与传输矩阵单元的个数是一样的。一旦得到了角谱的集合,原始物体的图像就可以通过(1)式重构出来。

### 3 相位解调原理及传输矩阵的标定

#### 3.1 一维希尔伯特变换及相位解调原理

对于一个实信号  $x(t)$ , 其希尔伯特变换为  $y(t)$ 。对一个实信号进行希尔伯特变换, 等效于使其在频率域相移  $90^\circ$ 。例如, 信号  $\cos(Xt)$  的希尔伯特变换是  $\sin(Xt)$ , 并且会滤去直流成分<sup>[18]</sup>。光学测量得到的干涉条纹图一般光强表达式为

$$I_0(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\Delta\phi(x, y)], \quad (4)$$

式中  $a(x, y)$  为背景光强,  $b(x, y)$  为振幅。当它们都是缓变函数时, 可以用常数  $a$  和  $b$  表示,  $\Delta\phi(x, y)$  为所要求解的相位函数。

利用希尔伯特变换可以去除直流分量的特性, 提出了两次希尔伯特变换去除直流分量的方法。

$$H[I_0(x, y)] = b \sin[\Delta\phi(x, y)], \quad (5)$$

$$H\{H[I_0(x, y)]\} = -b \cos[\Delta\phi(x, y)], \quad (6)$$

式中  $H[\cdot]$  表示进行希尔伯特变换。(5) 式相对于  $I_0$  来说去除了直流分量。由两次希尔伯特变换得到正弦和余弦分量, 即可得到相位分布

$$\Delta\phi(x, y) = \tan^{-1} \left\{ -\frac{H[I_0(x, y)]}{H\{H[I_0(x, y)]\}} \right\}. \quad (7)$$

文献[19]中指出, 有环形条纹时会出现相位的翻转(在相位变化的拐点处相位计算结果的符号发生突变)。对相位翻转问题的处理方法对单峰和单谷的情形比较容易实现, 但不易推广到复杂的光场, 故应尽量避免环形条纹出现, 通常通过参考光倾斜入射的方法来实现<sup>[17]</sup>。

#### 3.2 散斑干涉场的相位解调

在散斑干涉问题中, 希尔伯特变换相位解调的基本条件(振幅缓变)不再成立, 上述直接利用希尔伯特变换求解相位的方法不再适用。

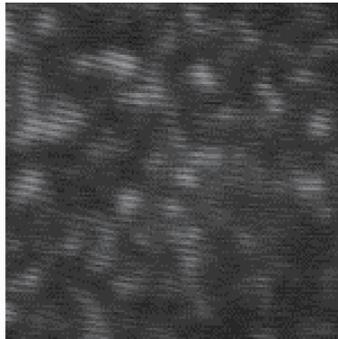


图 2 散斑干涉条纹的局部

Fig. 2 Part of speckle interference fringe image

CCD 拍摄的图像是光场的强度分布而不是复电场分布,这会导致散射场的相位信息丢失。此外,由于振幅和相位都会影响到干涉条纹的结果,很难从一个单一的干涉条纹图案计算出振幅和相位信息,得到复电场。根据计算结果,对于强度急剧变化的散斑场(图 2),这种振幅变化对干涉条纹结果的影响会更为显著,若直接利用希尔伯特变换,会产生非常大的误差。

为了准确地提取相位信息,必须尽量剔除振幅的变化。为此引入了以下方法。在这种方法中,需要为每个波矢量( $k_x, k_y$ )对应的传输矩阵单元记录相应的 4 幅图像。这 4 幅图像分别是物体光场、参考光场、散斑干涉图像和背景光图像。在物光和参考光路中分别加入一个高速光学快门,通过快门开、关状态的组合可以依次实现扭曲光场图像(物光光路开、参考光路关)、参考光图像(物光光路关、参考光路开)、干涉条纹图像(物光光路开、参考光路开)和背景光图像(物光光路关、参考光路关)等 4 幅图像的拍摄。在后续内容中,将这 4 幅图像依次记为 1,2,3,4。部分拍摄结果如图 3 所示。

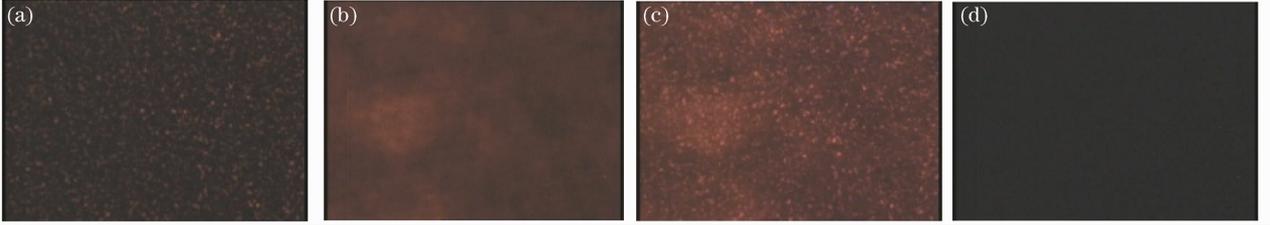


图 3 浑浊介质成像系统拍摄的图像。(a)扭曲的图像;(b)参考光图像;(c)干涉条纹图像;(d)背景图像

Fig. 3 Images captured by TLI system. (a) Distorted image; (b) reference beam image; (c) interference fringe image; (d) background image

由于拍摄速度较快,可以认为 4 幅图像中的背景光几乎不变。根据光的干涉理论,这 4 幅图像之间存在以下关系:  $I_1 = |E_1|^2 + I_4$ ,  $I_2 = |E_2|^2 + I_4$ ,  $I_3 = |E_1|^2 + |E_2|^2 + 2|E_1||E_2|\cos(\Delta\phi) + I_4$ , 其中图像强度  $I_1, I_2, I_3, I_4$  和光场振幅  $|E_1|, |E_2|$  都是像面( $x, y$ )的函数。因而,散射光场相位的余弦可以表示为

$$\cos(\Delta\phi) = \frac{I_3 - I_1 - I_2 + I_4}{2\sqrt{I_1 - I_4} - \sqrt{I_2 - I_4}}. \quad (8)$$

对余弦  $\cos(\Delta\phi)$  进行希尔伯特变换就可以得到散射光场相位的正弦<sup>[12]</sup>,由  $\sin(\Delta\phi)$  和  $\cos(\Delta\phi)$  可以表示复相位因子  $\exp(i\Delta\phi)$ 。至此,可以得到散射光场的复振幅为

$$E_1(x, y) = \sqrt{I_1 - I_4} \exp(i\Delta\phi). \quad (9)$$

### 3.3 传输矩阵的标定

要得到浑浊介质的传输矩阵,需要标定每一束平面波在浑浊介质中的输出响应。为此,去掉物体,以平面波直接照射浑浊介质,并通过双轴振镜(GM)实现光束方向的扫描。对于每一个方向,记录对应的 4 幅图像,经过相位解调后得到复电场  $E_1(x, y)$ ,对应于波矢量( $k_x, k_y$ )。这时的复电场即为传输矩阵单元,记为

$$E_i(x, y; k_x, k_y) = \sqrt{I_1 - I_4} \exp(i\Delta\phi). \quad (10)$$

然而不可能对所有方向的传输矩阵单元都进行标定。在实际过程中,需要对连续的波矢量空间离散化,只要取到足够多的传输矩阵,就可以对浑浊介质的传输特性进行完整无误的描述。

### 3.4 相位解调结果及分析

在提出的方法中,散斑振幅(强度)的变化对相位解调的影响被完全剔除掉,因而不管是振幅还是相位的计算结果都比直接使用希尔伯特变换处理干涉条纹得到的结果要准确。用上述两种方法计算散斑图像振幅的部分结果如图 4 所示。图 4(a)给出了本文改进的方法计算的散斑振幅分布。图 4(b)为传统的直接利用希尔伯特变换计算的散斑振幅分布。对比图 4(a)、(b)可知,两种处理方法得到的振幅分布结果存在显著的差别,而改进的方法是基于光的干涉的基本原理,因而结果更为准确,说明直接用希尔伯特变换计算散斑振幅的结果误差较大。进一步以改进的方法得到的结果为标准,求出传统的直接利用希尔伯特变换方法计算的振幅分布结果的误差,各像素点的误差除以改进方法的结果则得到各点振幅结果的相对误差,计算结果表明,传统的直接利用希尔伯特变换方法计算的振幅分布结果在对应所有图像像素中最大的相对误差接近 5 倍。对于同一干涉条纹来说,振幅有很大的误差就意味着相干结果中的余弦项误差也很大,造成对应的相位

也会有很大的误差。因此,提出的改进方法比直接使用希尔伯特变换计算散斑的振幅和相位更准确。

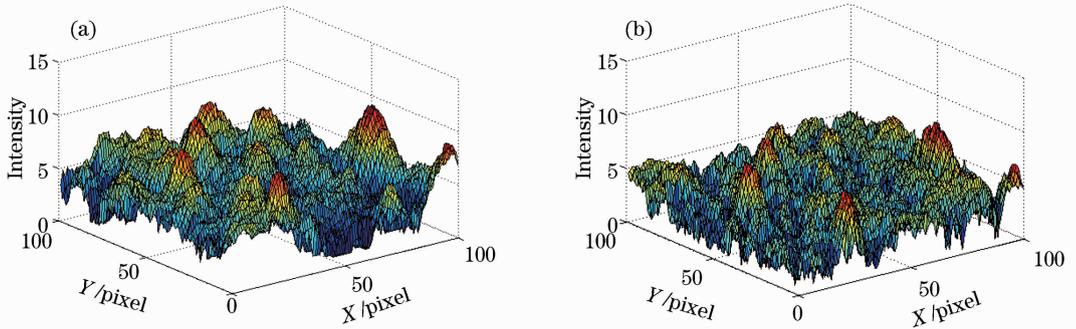


图 4 两种方法计算的散斑图像振幅的部分结果。(a)改进方法计算的振幅结果;  
(b)传统的直接利用希尔伯特变换计算的振幅结果

Fig. 4 Partial amplitude data of speckle image calculated by two methods. (a) Amplitude calculated by the new method;  
(b) amplitude calculated by the traditional method with direct Hilbert transform

## 4 结 论

基于浑浊透镜成像可以重建被浑浊介质多光散射扭曲的图像。为每个波矢量( $k_x, k_y$ )对应的传输矩阵单元用 CCD 记录相应的 4 幅图像:扭曲光场图像、参考光图像、干涉条纹图像和背景光图像。根据干涉理论的对对应关系换算出干涉余弦因子,对余弦因子应用希尔伯特变换进行相位解调就可以比较准确地恢复出散斑的相位。这种方法剔除了振幅变化对相位解调结果的影响,可以准确地输出光场的复电场(复振幅)信息。通过上述方法,成功地计算出扭曲图像的复电场和浑浊介质的传输矩阵。由于对振幅的测量采用直接方法,因而更加准确。对于散斑干涉条纹来说,本文计算结果要比直接希尔伯特变换相位解调的结果准确得多。

## 参 考 文 献

- 1 Khokhra R, Kumar M, Rawat N, *et al.*. Enhancing the numerical aperture of lenses using ZnO nanostructure-based turbid media[J]. *J Opt*, 2013, 15(12): 125714.
- 2 Conkey D B, Caravaca-Aguirre A M, Piestun R. High-speed scattering medium characterization with application to focusing light through turbid media[J]. *Opt Express*, 2012, 20(2): 1733–1740.
- 3 Mosk A. Imaging and focusing through turbid media[J]. BODA, 2013: JW1A.1
- 4 Aulbach J, Gjonaj B, Johnson P M, *et al.*. Control of light transmission through opaque scattering media in space and time[J]. *Phys Rev Lett*, 2011, 106: 103901.
- 5 Vellekoop I M, Lagendijk A, Mosk A P. Exploiting disorder for perfect focusing[J]. *Nat Photon*, 2010, 4: 320–322.
- 6 Jin Haoqiang, Shi Jianhong, Peng Jinye, *et al.*. Looking around corners and through turbid media with projector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0511006.
- 7 金浩强,石剑虹,彭进业,等. 基于投影仪的“街角成像”和穿透散射介质成像[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0511006.
- 7 Goodman J W. *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications*[M]. Englewood: Roberts & Company, 2007: 112–115.
- 8 Vellekoop I M, Van Putten E G, Lagendijk A, *et al.*. Demixing light paths inside disordered metamaterials[J]. *Opt Express*, 2008, 16(1): 67–80.
- 9 Choi Y, Yang T D, Fang-Yen C, *et al.*. Overcoming the diffraction limit using multiple light scattering in a highly disordered medium[J]. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 023902.
- 10 Popoff S M, Lerosey G, Carminati R, *et al.*. Measuring the transmission matrix in optics: An approach to the study and control of light propagation in disordered media[J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 100601.
- 11 Choi Y, Kim M, Yoon C, *et al.*. Synthetic aperture microscopy for high resolution imaging through a turbid medium[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(21): 4263–4265.
- 12 Choi Y, Yoon C, Kim M, *et al.*. Optical imaging with the use of a scattering lens[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electr*, 2014, 20(2): 6800213.
- 13 Duan Yiting, Li Guangyu, Gao Zhan. Review of laser biospeckle measurement technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(2): 020003.
- 14 段怡婷,李光宇,高 瞻. 生物散斑测量技术综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(2): 020003.
- 14 Ikeda T, Popescu G, Dasari R R, *et al.*. Hilbert phase microscopy for investigating fast dynamics in transparent systems[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(10): 1165–1167.

- 15 Zhang Min, Tang Feng, Wang Xiangzhao, *et al.*. Phase retrieval errors analysis of interferogram using two dimensional fast Fourier transform method[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3):0308002.  
张 敏,唐 锋,王向朝,等. 二维快速傅里叶变换干涉图相位提取误差分析[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0308002.
- 16 Liu Jian, Tian Ailing, Liu Bingcai, *et al.*. A phase extraction algorithm in wavelength tuning interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0312001.  
刘 剑,田爱玲,刘丙才,等. 一种变频相移干涉测量的相位提取算法[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0312001.
- 17 Yu Cheng, Li Sikun, Wang Xiangzhao. Fast three-dimensional shape measurement technique by means of wavelet transform based on parallel computing[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0512005.  
余 程,李思坤,王向朝. 基于并行小波变换的快速三维面形测量技术[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0512005.
- 18 Lv J, Wang M, Huan H, *et al.*. Fringe analysis with Hilbert transform and its application to the measurement of aspheric mirror[C]. SPIE, 2007, 6723: 67231D.
- 19 Xiong Liudong, Jia Shuhai, Du Yanfen. A novel Hilbert transform algorithm for phase evaluation from fringe pattern[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(9): 1678—1681.  
熊六东,贾书海,杜艳芬. 基于希尔伯特变换的干涉条纹相位解调新算法[J]. 光子学报, 2010, 39(9): 1678—1681

栏目编辑: 吴秀娟