

# 时频域双重分析法抗干扰移相干涉术

王 明 郝 群 朱秋东 胡 瑶

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

**摘要** 针对移相干涉术易受振动、气流等扰动影响的问题,提出一种时频域双重分析法的抗干扰移相干涉测量方法。采集一系列连续移相的干涉图,通过对干涉图上各点时序光强进行频谱的宽带滤波提取到干涉图采集过程中真实的相位变化,对时序的相位变化信息进行线性统计得到各点初始相位的计算值。在干涉图帧数足够多的情况下,线性统计后随机噪声的影响趋于零,环境振动等非随机性扰动的影响被归结为一个与像素坐标无关的值从而不影响波面形状,因此不影响面形测量精度。通过仿真实验验证了该方法的可行性。将该方法应用在普通实验室条件下的机械式移相干涉测量系统中进行实际的测量,结果与同一个被测件在 FISBA 干涉仪中的测量结果很好地吻合,验证了该方法的抗干扰能力。

**关键词** 测量;移相干涉术;抗扰动;时频域双重分析方法

**中图分类号** TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1112005

## Anti-Disturbance Phase-Shifting Interferometry Method Time-and-Frequency-Domain

Wang Ming Hao Qun Zhu Qiudong Hu Yao

(*Optoelectronic School, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

**Abstract** Because interferometry is highly sensitive to disturbance such as vibration and air flow, a time-and-frequency domain (TFD) interferometry is proposed. A large number of continuous phase-shifting interferograms are captured. A distorted series of phase variety during fringe capturing is obtained through wide bandwidth filter to the spectrum of intensity series from a particular pixel, and then a linear statistic of it gives the measuring result of initial phase. With a large enough number of frames, the linear statistic efficiently reduces random noises to zero. And influences introduced by other non-random disturbances are ascribed into a value which is independent of the index of pixels and therefore does not influence the shape of the whole wavefront. A simulation confirms the feasibility of the TFD method, and an experiment is carried out applying TFD method in a mechanical phase-shifting interferometric system fixed in a normal laboratory environment. The result prettily matches that from a FISBA interferometer, which verifies the anti-noise ability of TFD method.

**Key words** measurement; phase-shifting interferometry; anti disturbance; time-and-frequency domain method

**OCIS codes** 120.3180; 120.4800; 120.5050; 120.6650

## 1 引 言

移相干涉测量技术在光学元件尤其是大口径光学元件的测量中得到了广泛应用。其原理是在干涉仪的两相干光程间引入有序的相移,过程中对干涉图采样,根据光强的变化采用四步法等算法计算出相位分布。早期的移相干涉仪以压电陶瓷机械式移相为代表<sup>[1]</sup>,对环境振动很敏感。国际上陆续出现

了多种抗振的算法<sup>[2~5]</sup>,均取得了一定成效,但普遍只对小振幅的振动有效。

同步移相干涉测量方法<sup>[6]</sup>克服了环境振动的影响,但分光路各 CCD 空间一致性的调整非常困难<sup>[7]</sup>。Millerd 等<sup>[8,9]</sup>发明的新型技术避免了这个问题,随后 Wyant<sup>[10]</sup>又将这种方法在菲佐干涉仪中加以发展。这类方法在抗振动的同时降低了空间分

**收稿日期**: 2011-04-12; **收到修改稿日期**: 2011-06-10

**基金项目**: 国家自然科学基金(60578053)资助课题。

**作者简介**: 王 明(1983—),男,博士研究生,主要从事光学精密测量及光学设计等方面的研究。

E-mail: wang0425@gmail.com

**导师简介**: 郝 群(1968—),女,博士,教授,主要从事光学精密测量及光电仪器等方面的研究。E-mail: qhao@bit.edu.cn

辨率,且相位掩模板高昂的制作成本影响了系统的推广。左芬等<sup>[11]</sup>提出一种新型的基于二维光栅的同步移相方案,虽然降低了系统成本,但这类方法易受随机噪声的影响。

Zygo 公司发布了一种单帧干涉图二维频谱滤波的 FlashPhase 移相干涉仪<sup>[12]</sup>。处理过程只需要一帧干涉图,因此环境振动对测量结果没有影响,但通常需要 30~60 frame 干涉图计算取平均才能克服随机噪声对测量结果的影响。

变频移相干涉术<sup>[13]</sup>结构简单,抗振动能力强,在大口径干涉测量<sup>[14,15]</sup>中有着显著的优点,但移相步长的精确控制实现起来很复杂。Deck<sup>[16]</sup>提出的傅里叶变换移相干涉术可通过提取频谱中基频的峰值计算初始相位,但是当存在环境振动时,基频的峰值会被减弱甚至淹没,此时这种方法便失去效力了。

Hao 等<sup>[17]</sup>提出了一种不需要特殊减振设备的基于随机移相原理的时空域波前检测方法,简化了测量系统,提高了抗扰动能力。由于需要计算每一帧干涉图的相位分布,其计算过程很耗时。为缩短计算时间,Xu 等<sup>[18]</sup>提出只根据一帧干涉图计算原始相位分布,提高了系统的运算效率,但忽略了随机噪声对测量结果的影响。另外,这两种方法均将光强极值作为计算参数,通常需要相当高的采样帧频和足够多的采样帧数才能保证测量精度。

本文提出一种时频域双重分析法的移相干涉术,通过对时序光强频谱的带宽滤波和傅里叶逆变换得到各点上真实的时序相位变化信息,然后对时序的相位做线性统计得到被测相位的计算值。时频域分析方法的处理过程明显降低了对采样帧频和采样帧数的要求。采用时频域双重分析法的移相干涉测量系统具有结构简单、成本低廉和抗干扰等优点。

## 2 时频域双重分析法原理

移相干涉测量系统中,当移相速率为  $f_0$  (即干涉图每秒移动  $f_0$  个条纹) 时,干涉场中某点的光强理想条件下为频率等于  $f_0$  的余弦变化,可表示为

$$I(x, y, t) = I_0 \{1 + V \cos[2\pi f_0 t + \varphi(x, y)]\}, \quad (1)$$

式中  $I_0$  是光强均值,  $V$  是对比度,  $\varphi(x, y)$  是  $(x, y)$  处的被测初相位。

实际测量过程中,由于各种干扰因素的存在,(1)式变为

$$I(x, y, t) = I_0 \{1 + V \cos[2\pi f_0 t + \varphi(x, y) + \delta(t) + \delta_r(x, y, t)]\}, \quad (2)$$

式中  $f_0$  是移相速率的线性部分,  $\delta(t)$  是环境振动等

非随机性干扰引起的相位畸变,  $\delta_r(x, y, t)$  是 CCD 随机噪声和气流扰动等随机扰动引起的相位畸变的等效值。

在满足 Nyquist 采样定理条件下采集多幅干涉图,在某点上得到的时序光强为

$$I(x, y, t_n) = I_0 \{1 + V \cos[2\pi f_0 t_n + \varphi(x, y) + \delta(t_n) + \delta_r(x, y, t_n)]\}. \quad (3)$$

将(3)式中的直流量去除即减去序列的均值,剩余的交流部分的信号改写为

$$s(x, y, t_n) = \frac{I_0 V}{2} [a(x, y, t_n) \exp(i2\pi f_0 t_n) + a^*(x, y, t_n) \exp(-i2\pi f_0 t_n)], \quad (4)$$

式中

$a(x, y, t_n) = \exp\{i[\varphi(x, y) + \delta(t_n) + \delta_r(x, y, t_n)]\}$ , 包括扰动在内的所有相位信息均在此项中,  $a^*(x, y, t_n)$  是  $a(x, y, t_n)$  的复共轭。

对(4)式做快速傅里叶变换,其频谱可简单表示为

$$S(x, y, f_n) = \frac{I_0 V}{2} [A(x, y, f_n - f_0) + A^*(x, y, f_n + f_0)], \quad (5)$$

式中  $f_n$  为频谱中离散化的频率轴,频谱的示意图见图 1。

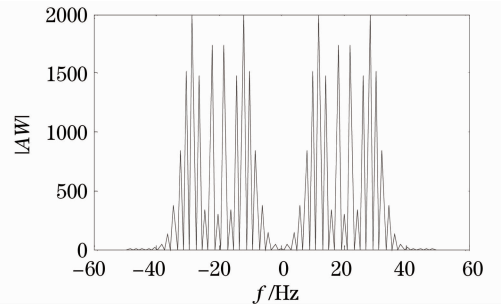


图 1 光强序列的频谱示意图

Fig. 1 Spectrum of an intensity array

理论上讲,在本文提出的方法中采样帧频只要满足采样定理即可。但是由于扰动的存在,此时的频谱基频会如图 1 所示的被展宽,为了尽可能保证不产生频谱交叠,时频域双重分析法中采样帧频为移相速率 4 倍时为最佳。相对于文献<sup>[17,18]</sup>中的时空域的处理方法,本文提出的方法在相同移相速率的条件下可明显降低对采样帧频的要求,即在相同干涉图采集设备条件下可允许的移相速率更高,因此该方法能拥有更强的抗扰动能力。

如图 1 所示,  $a(x, y, t_n) \exp(i2\pi f_0 t_n)$  和  $a^*(x, y, t_n) \exp(-i2\pi f_0 t_n)$  的傅里叶变换由于载波的存在被拉开了,分别位于频谱中的  $f_0$  和  $-f_0$  附近。此时对图 1 所示的频谱进行宽带滤波,将  $A(x, y, f_0 -$

$f_n$ ) 中的所有信息滤出, 目的是在后续的时域线性统计过程中能够复原干涉图采集过程中相位的所有真实变化。对于只与时间有关的如环境振动和移相非线性引起的频谱的展宽, 不同像素点上展宽后的频谱能量分布是相同的, 相互间只有相位的区别。在不存在频谱交叠的条件下, 只要滤波窗口足够宽就可以将仅与时间有关的扰动引起的频谱展宽完整地截取并保留在滤波后的信息中。而既与时间有关又与空间有关的随机性扰动在频谱中表现为一个在无限长的带宽范围内的随机性分布。宽带滤波的过程在保证完整地包含时间性扰动信息的同时, 对随机性扰动的信息只能做到尽可能多地截取。滤出部分沿频率轴左移  $f_0$ 。即将基频点移到零点, 再对其作傅里叶逆变换并提取其中的相位信息可得

$$\Phi(x, y)_n = \varphi(x, y) + \delta(t_n) + \delta_r(x, y, t_n). \quad (6)$$

由于在逆变换前进行了移频, (6) 式中未出现斜率项。当移相速率较大以致相邻两帧干涉图间的移相量接近一个包裹时, 对(6)式进行时域解包裹计算时将无法区分时序相位曲线中相邻两点间究竟是正常的移相量还是相位包裹<sup>[19]</sup>, 移频操作可有效避免这个问题。实际操作中由于基频被展宽, 只能通过质心法大致确定基频  $f_0$  的位置进行移频, 这样也可达到相同的效果。设干涉图帧数为  $N$ , 对(6)式作线性统计, 结果为

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{N} \left[ N\varphi(x, y) + \sum_{n=1}^N \delta(t_n) + \sum_{n=1}^N \delta_r(x, y, t_n) \right] = \varphi(x, y) + \Delta\Phi + \Delta\Phi_r(x, y), \quad (7)$$

式中  $\Delta\Phi = \frac{1}{N} \left[ \sum_{n=1}^N \delta(t_n) \right]$ , 代表测量过程中非随机性扰动对测量结果的影响, 其中包括环境振动、移相非线性等因素;

$$\Delta\Phi_r(x, y, t_n) = \frac{1}{N} \left[ \sum_{n=1}^N \delta_r(x, y, t_n) \right], \quad (8)$$

代表随机噪声对计算结果的影响, 其中包括大气扰动、CCD 随机噪声等。在满足采样条件、周期数足够多的情况下, 线性统计后  $\Delta\Phi_r(x, y)$  的值趋于零, 而  $\Delta\Phi$  被归结为一个与像素点的坐标无关的值

$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \delta(t_n)$ , 这个值不影响被测波前的形状, 只对整个波前增加一个活塞式的平移, 因此不影响整个波面的测量精度, 从而达到了抗扰动的目的。以 100 frame 干涉图为例, 线性统计的效果如图 2 所示。图 2 中线性统计的结果依然存在一定斜率, 其中第一个值即作为被测初始相位的计算值, 其与被测初始相位间

的差值即为(7)式中的  $\Delta\Phi + \Delta\Phi_r(x, y)$ , 被称作相位值的计算误差。对于不同的被测初始相位, 计算误差如图 3 所示, 可见对于不同被测初始相位, 计算值与真值的偏差是大致相等的。

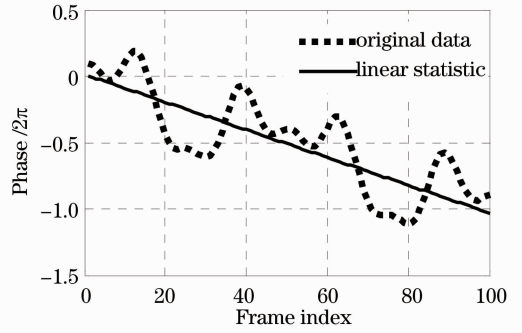


图 2 时序相位及线性统计结果

Fig. 2 Temporal phase and linear statistic

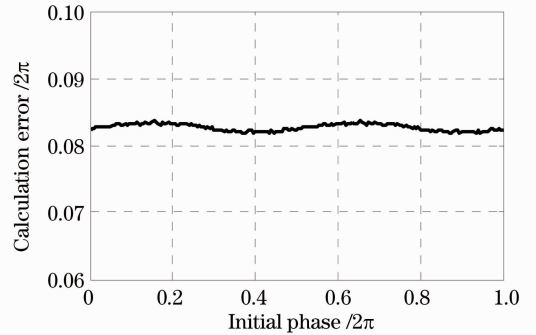


图 3 不同初始相位时的计算误差

Fig. 3 Calculation error at different initial phase

### 3 仿真实验验证

图 4(a) 所示的是一个用泽尼克多项式拟合出的被测理想波面。设定各工作参数为: 采样频率 100 Hz, 移相速率 20 Hz, 采样帧数为 50 frame。通过计算机对干涉图采集过程引入一个频率为 2 Hz、振幅为  $1.70\pi$  的振动和  $\sigma=2$  的随机噪声。经时频域波前检测方法重建的相位分布如图 4(b) 所示。

在图 4(a), (b) 中, 重建的波前与原始波前有一个整体的活塞式平移, 面形测量精度的峰-谷(PV) 值为  $0.0188\pi$ , 均方根(RMS) 值为  $0.0024\pi$ , 验证了本时频域检测方法的可行性。

### 4 实验验证

#### 4.1 系统组成

图 5 为移相干涉测量系统示意图。压电陶瓷(PZT) 作为移相元件, CCD 相机选用了 Point Grey 公司的 GRAS-03K2M-C, 1394 接口, 分辨力为  $640 \text{ pixel} \times$

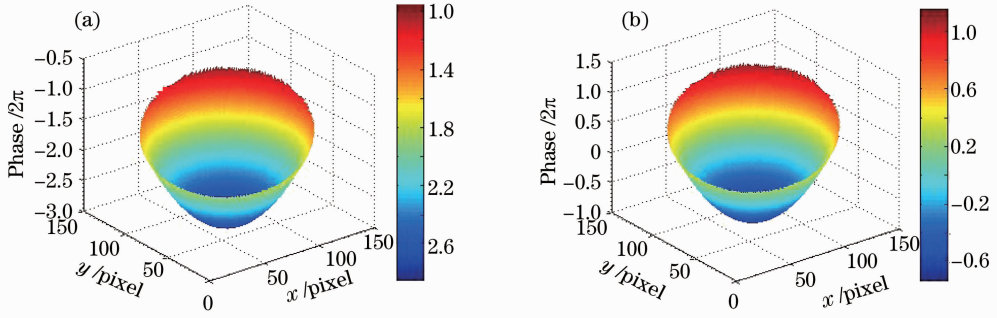


图 4 (a)原始波面;(b)重建的相位分布

Fig. 4 (a) Original wave front; (b) reconstructed wave front

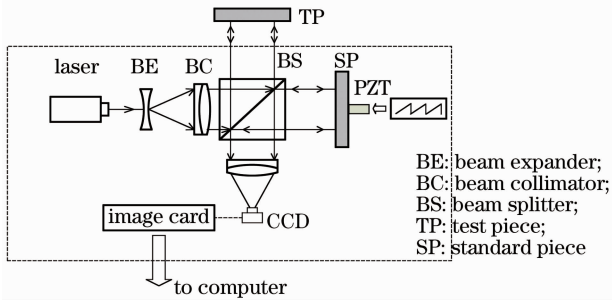


图 5 移相干涉系统结构图

Fig. 5 Structure diagram of the phase-shifting interferometer 480 pixel,最高采样帧频达 200 frame/s。采集到的干涉图送入计算机,预处理后通过 Matlab 编写的时频域波前检测算法重建被测波前的原始相位分布。

### 4.2 实验验证

选用一片有效孔径为 10 mm 的平面镜作为被测

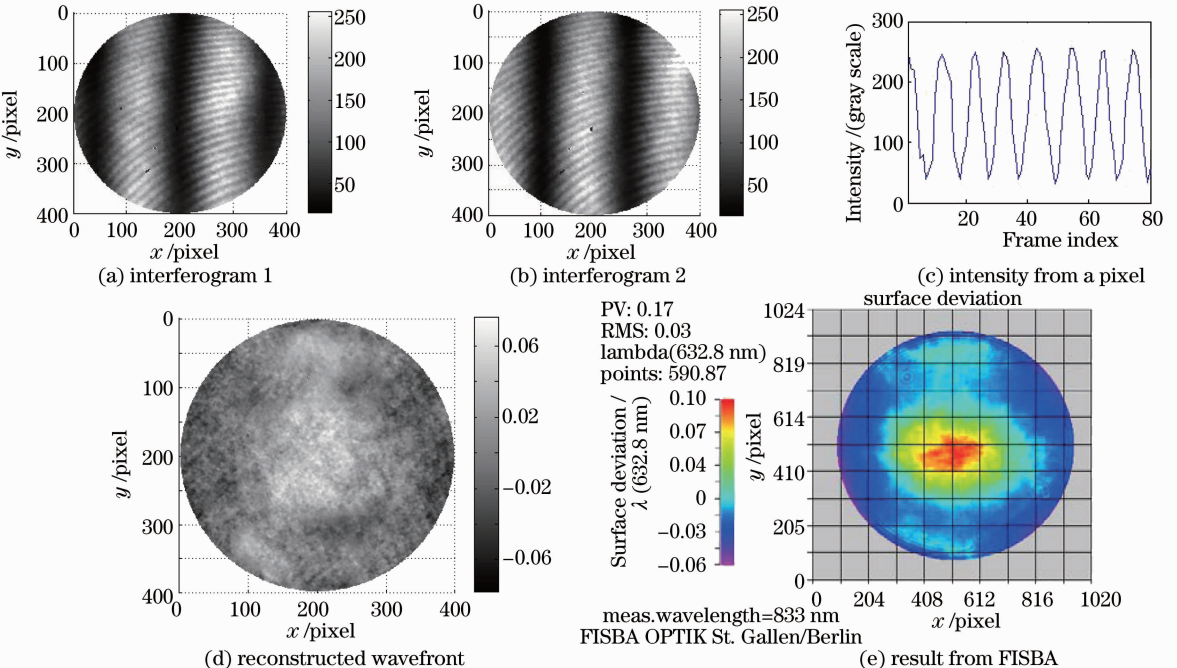


图 6 测量结果及对比图

Fig. 6 Experimental result and comparison

元件,在如图 5 所示的测试系统中进行测量。测试系统放置于普通的实验室环境中,实验参数设定为:采样帧频 100 frame/s,移相速率约为  $20\pi/s$ ,总采样帧数 80 frame, CCD 的有效分辨力为  $400 \text{ pixel} \times 400 \text{ pixel}$ 。压电陶瓷被一个周期为 1 s,幅值为  $0 \sim 100 \text{ V}$  的锯齿波调制产生连续移相。由于干涉图中存在干扰条纹,所有干涉图先送入 Matlab 进行预处理后再经时频域双重分析方法重建原始波前的相位分布。干涉图的采集耗时 1 s,预处理耗时 30 s,时频域双重分析法的处理过程耗时 12 min。其中的两幅干涉图如图 6(a),(b)所示,某点上提取到的时序光强曲线如图 6(c)所示,经时频域波前检测方法重建的波前图如图 6(d)所示。最终测得的面形 PV 值为  $0.3082\pi$ ,RMS 值为  $0.0462\pi$ ,10 次测量的重复精度为  $0.012\pi$ 。

为了验证本时频域检测算法的精度,对同一个元件用放置于气垫隔振台上的 FISBA 移相干涉仪( $\mu$ Phase 2HR)再次进行了测量。FISBA 移相干涉仪测量精度为  $2\pi/15$ ,重复精度为  $2\pi/500$ ,测得的面形 PV 值为  $0.34\pi$ ,RMS 值为  $0.06\pi$ ,重构波前如图 6(e)所示。时频域分析法的结果与 FISBA 干涉仪的测量结果相吻合,对比验证了时频域波前检测方法的有效性及其抗扰动能力。

## 5 结 论

提出了一种抗扰动的时频域波前检测方法,具有系统简单、成本低廉和抗扰动性能优异等特点,并通过仿真实验验证了方法的可行性。在普通实验室条件下实际测量了一个光学元件的面形参数,并将测量结果与在隔振良好的 FISBA 干涉仪中测量的结果进行比较,证明采用时频域波前检测方法的移相干涉测量系统具有很好的抗干扰能力。

### 参 考 文 献

- 1 J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher *et al.*. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses[J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(11): 2693~2703
- 2 Peter L. Wizinowich. Phase shifting interferometry in the presence of vibration: a new algorithm and system[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(22): 3271~3279
- 3 Lü Xiaoxu, Zhong Liyun, Zhang Yimo. A method of phase-shifting measurement by the difference of phase-shifting interferograms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 603~608  
吕晓旭, 钟丽云, 张以谟. 通过相移条纹图差分测定相移量的方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 603~608
- 4 I. B. Kong, S. W. Kim. General algorithm of phase-shifting interferometry by iterative least-squares fitting [J]. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(1): 183~188
- 5 K. Hibino, B. F. Oreb, D. I. Farrant *et al.*. Phase-shifting algorithms for nonlinear and spatially nonuniform phase shifts [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(4): 918~930
- 6 R. Smythe, R. Moore. Instantaneous phase measuring interferometry[J]. *Opt. Engng.*, 1984, **23**(4): 361~364
- 7 Joonku Hahn, Hwi Kim, Yongjun Lim *et al.*. Spatial phase-shifting interferometry with compensation of geometric errors based on genetic algorithm [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(12): 1113~1116
- 8 J. E. Millerd, N. J. Brock. Methods and apparatus for splitting, imaging and measuring wave fronts in interferometry: U. S. Patent, 6 304 330 [P]. 2001
- 9 James E. Millerd, Neal J. Brock, John B. Hayes *et al.*. Pixelated phase-mask dynamic interferometer[C]. *SPIE*, 2004, **5531**: 304~314
- 10 James C. Wyant. Improved interferometric optical testing [J]. *Optics and Photonics News*, 2007, **18**(7): 32~37
- 11 Zuo Fen, Chen Lei, Xu Chunsheng. Simultaneous phase-shifting interferometry based on two-dimension grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 663~667  
左 芬, 陈 磊, 徐春生. 基于二维光栅分光的同步移相干涉测量技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 663~667
- 12 Zygo Corporation. FlashPhase™ data acquisition system [OL]. <http://www.lambdaphoto.co.uk/pdfs/FlashPhase.pdf>
- 13 Mitsuo Takeda, Hirokazu Yamamoto. Fourier-transform speckle profilometry: three-dimensional shape measurements of diffuse objects with large height steps and/or spatially isolated surfaces [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(34): 7829~7837
- 14 Chai Liqun, Xu Qiao, Deng Yan *et al.*. 500-mm-aperture wavelength-tuning phase-shifting interferometer [C]. *SPIE*, 2006, **6150**: 61500E
- 15 Leslie L. Deck, James A. Soobitsky. Phase-shifting via wavelength tuning in very large aperture interferometers [C]. *SPIE*, 1999, **3782**: 432~442
- 16 Leslie L. Deck. Fourier-transform phase-shifting interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(13): 2354~2365
- 17 Qun Hao, Qudong Zhu, Yao Hu. Random phase-shifting interferometry without accurately controlling or calibrating the phase shifts[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(8): 1288~1290
- 18 Jiancheng Xu, Qiao Xu, Liqun Chai *et al.*. Direct phase extraction from interferograms with random phase shifts [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(20): 20620~20627

栏目编辑: 何卓铭