

瞬态形变的高速时域散斑干涉测量

李翔宇¹ 黄战华¹ 朱 猛² 张 昊² 李秀明²

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

²天津航技术物理研究所, 天津 300308

摘要 在迈克耳孙式干涉光路的基础上结合高速摄像和采集系统,利用时域散斑干涉测量技术,实现了瞬态三维形变场的实时测量。物体发生形变时会产生一个时变的散斑干涉场,通过连续采集的散斑干涉图序列便可得到各个像素点的一维时域干涉信号,即光强随时间的变化关系。在利用经验模态分解对干涉信号进行降噪处理之后,借助于希尔伯特变换的相移作用完成信号相位的解调,并在时域中进行相位展开,最终通过逐点分析获得全场的相位分布。为了验证该方法的有效性,对由压电陶瓷驱动的瞬态离面形变进行了测量。结果表明,该方法可在1000 frame/s的采集速度下实现动态形变的实时测量。与传统相移法相比,该方法结构简单,易于实现,在时间和空间上都具有较高的分辨率。

关键词 测量; 瞬态形变; 时域散斑干涉; 经验模态分解; 希尔伯特变换

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0612002

Measurement of Transient Deformation Using High-Speed Temporal Speckle Pattern Interferometry

Li Xiangyu¹ Huang Zhanhua¹ Zhu Meng² Zhang Hao² Li Xiuming²

¹Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China

²Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China

Abstract Based on the Michelson-type interferometer combined with a high-speed imaging system, the whole-field transient deformation is measured in real time by using temporal speckle pattern interferometry. With the continuous movement or deformation of the object under study, a sequence of speckle patterns is recorded to acquire the temporal signal of interference intensity at each pixel of the image sensor. The wrapped phase information is extracted by Hilbert transform method, which is regarded as a phase shifter of 90°, and the phase unwrapping is subsequently performed in time domain. Finally, the two-dimensional deformation field is acquired by evaluating the phase information pixel by pixel. To verify the proposed approach, the out-of-plane deformation of the object impacted by a piezoelectric ceramic transducer is measured. The experimental results demonstrate that the transient deformation can be measured by this method under the capturing rate of 1000 frame/s. Comparing with the conventional phase shifting electronic speckle pattern interferometry, the proposed method does not only yield simple implementation, but also has a relatively high spatio-temporal resolution.

Key words measurement; transient deformation; temporal speckle pattern interferometry; empirical mode decomposition; Hilbert transform

OSIC codes 120.3180; 120.3940; 120.6160; 120.6165

收稿日期: 2014-12-24; 收到修改稿日期: 2015-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(61275009)、教育部博士点新教师基金(20110032120059)、天津市高等学校科技发展基金(20130711)

作者简介: 李翔宇(1986-),男,博士研究生,主要从事高速散斑干涉测量方面的研究。E-mail: tjulxy@tju.edu.cn

导师简介: 黄战华(1965-),男,博士,教授,主要从事光电图像处理与模式识别、光电子信息技术及多媒体计算机应用与控制方面的研究。E-mail: zhanhua@tju.edu.cn

1 引 言

散斑干涉是一种广泛用于漫反射物体表面形变或位移检测的光学测量技术,它具有全场、非接触、高精度、无损坏等特点^[1]。散斑干涉图的相位受到被测物表面形变或位移的调制,通过分析相位信息的变化便可间接地测量出形变或位移的大小。相移法是一种常用的相位解调方法,根据实现机理的不同主要可分为时间相移法和空间相移法两类。时间相移法需要在同一状态采集至少三张以上的相移图,在瞬态形变的条件下对相移元件的响应时间提出了很高的要求^[2]。而空间相移法则可分为多通道系统和单通道系统两类^[3-6]。多通道系统既可以通过多个相机同时采集相移图^[3],还可以通过光栅等元件实现单相机的单帧复用^[4]。这类系统虽然能够在同一时刻采集不同的相移图像,但其结构复杂,成本较高,且相移图对准较难。单通道系统多利用双孔或者双缝等引入载频,但大大地降低了光强,在高速摄像曝光时间很短的条件下成像困难^[5-6]。将时间轴引入到相位分析中,便形成了时域散斑干涉(TSPI),该方法不再仅考虑形变前后两个状态的二维空间信息,而是将物面的形变过程视为一个时变场来进行相位的分析^[7]。它通过连续采集散斑干涉图序列来获得单一像素点的光强随时间变化曲线,即一维的时域干涉信号。然后,依次分析各个像素点时域信号的相位变化来获取全场的相位分布,其常用的相位分析方法主要分为有基于强度分析和基于数学变换两类。前者由于其通过强度分析直接获取相位变化的方式对噪声比较敏感,主要包括相位扫描法和时间序列法等^[8]。而后者则借助于傅里叶变换^[9]、连续小波变换^[10]以及希尔伯特变换^[11-12]等进行相位的提取。其中,希尔伯特变换由于其计算简单等优点,在相位分析中得到了广泛的应用。

本文在迈克耳孙干涉光路基础上,利用高速摄像系统实现了瞬态形变的散斑干涉图序列的采集,获得了各个像素点的一维时域干涉信号。利用希尔伯特变换代替光学元件引入相移简化了系统结构。借助于信号的经验模态分解避免了背景强度的波动和随机噪声对相位提取的干扰,并对由压电陶瓷(PZT)驱动的橡胶板表面瞬态形变进行了测量以验证方法的适用性。

2 原 理

2.1 一维时域干涉信号

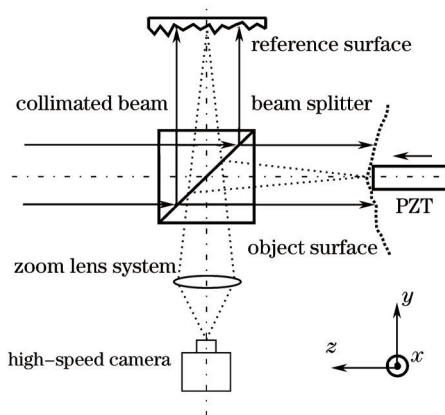


图 1 基于迈克耳孙干涉仪的时域散斑干涉图像采集系统示意图

Fig.1 Optical arrangement of imaging system based on Michelson-type interferometer in TSPI

高速时域散斑干涉测量光路如图 1 所示,为了保证两路干涉光光强的一致性,采用散射光作为参考光。当物体发生形变时,高速相机连续采集散斑干涉图样,在像素点 (x,y) 处第 t 帧的干涉光强可表示为

$$I(x,y,t) = I_o(x,y,t) + I_m(x,y,t)\cos[\psi(x,y,t)] + N(x,y,t), \quad t = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (1)$$

式中 $I_o(x,y,t)$ 表示背景强度, $I_m(x,y,t)$ 表示调制强度, $N(x,y,t)$ 表示噪声项。相位项 $\psi(x,y,t) = \phi(x,y,t) + \alpha(x,y,t)$, 其中 $\phi(x,y,t)$ 代表散斑场的随机相位,而 $\alpha(x,y,t)$ 则与形变大小有关,即为待求量。由于仅考虑各个像素点上光强随时间的变化关系,坐标 (x,y) 在下文中均被省略。

图 2 显示了在像素点(288,282)获取的一维时域干涉信号,可见它带有明显的变化趋势和随机噪声。图中较为缓慢的波动变化就是散斑相位受到形变量调制的结果,即代表了待求相位 $\alpha(t)$;而噪声项 $N(t)$ 则变化较

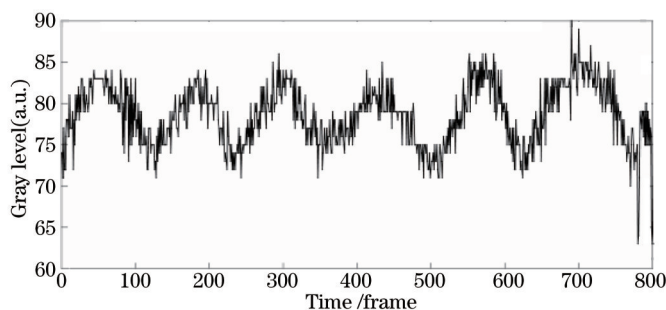


图2 像素点(288,282)光强随时间的变化曲线

Fig.2 Time-varying signal obtained at pixel (288,282)

快且呈现随机特性。另外,背景强度 $I_0(t)$ 的波动对于后续的相位解调也会带来影响,因此在进行希尔伯特变换之前需要滤除。

2.2 信号的经验模态分解

经验模态分解(EMD)是一种数据驱动的滤波方法,常用于非平稳信号的降噪处理。它可将复杂信号分解为有限个本征模态函数(IMF),分解出来的各个 IMF 分量包含了原信号在不同时间尺度下的信息,且均为窄带的平稳信号^[13]。因此,EMD 这种基于信号在时间尺度上局部特性的分解方法具有很强的自适应性,其表达式为

$$I(t) = \sum_{i=1}^N I_{IMF_i}(t) + r(t), \quad (2)$$

式中 $I_{IMF_i} (i=1,2,3, \dots, n)$ 是分解所得的各阶本征模态函数,既包含了高频的噪声项,又包含了缓慢变化的待求趋势项, $r(t)$ 是通过迭代求解 I_{IMF_i} 所剩下的残余量,代表了(1)式中干涉信号的背景强度项 $I_0(t)$ 。图3表明图2所示信号的经验模态分解结果, IMF 函数序列从高频到低频由上到下依次排列,表征了信号在不同时间尺度下的变化趋势,可见 I_{IMF5} 与原信号的变化规律相近。

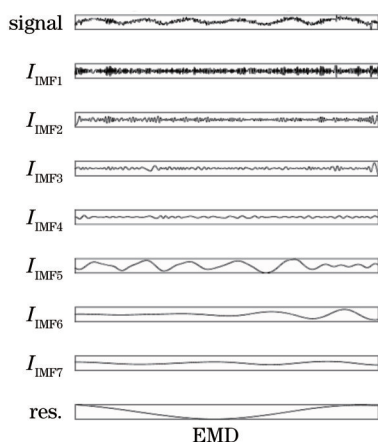


图3 噪声信号的经验模态分解

Fig.3 EMD of the noisy signal

通常地,第一阶本征模态函数 I_{IMF1} 可被视为噪声项,即可将滤波后的信号表示为

$$S^{(1)}(t) = I(t) - I_{IMF1}(t) - r(t), \quad (3)$$

但对于如图2所示的信号, I_{IMF1} 显然并不能代表所有的噪声项,即 $I_{IMF1} \neq N(t)$, 滤波后信号 $S^{(1)}(t)$ 中的 I_{IMF2} 、 I_{IMF3} 和 I_{IMF4} 仍旧包含了噪声项的不同成分。为了尽量避免高频噪声对信号的干扰,需要滤除更多低阶的 IMF,故重新定义滤波后的信号为

$$S^{(k)}(t) = I(t) - \sum_{i=1}^k I_{IMF_i}(t) - r(t), \quad (4)$$

式中 k 代表了包含噪声项的 IMF 的最高阶数。最高阶数 k 的确定是滤波的关键,需要保证重建信号与原信号具有相同的变化趋势,即具有相同的低频成分。因此,通过计算原信号与各阶 IMF 的互相关系数 X_i 来确定与

原信号变化趋势最接近的 IMF, 即 $I_{IMF_{k+1}}$ 。定义各阶本征模态函数 I_{IMF_i} 与原信号的互相关系数 X_i 如下:

$$X_i = \langle I_{IMF_i}(t), I(t) \rangle. \quad (5)$$

表 1 显示了各个 IMF 与原函数的互相关系数, 可以看出, I_{IMF_5} 和原信号具有较高的相似度, 与图 3 显示的分解结果一致, 即可知 $k=4$ 。故该像素点滤波后的时域信号可表示为 $S^{(4)}(t) = I_{IMF_5}(t) + I_{IMF_6}(t) + I_{IMF_7}(t)$, 其光强随时间的变化曲线如图 4 所示。

表 1 各阶本征模态函数 I_{IMF_i} 与原信号 $I(t)$ 的互相关系数计算

Table 1 Correlation coefficient between the different IMF and the original signal

I_{IMF_i}	X_i
$i=1$	0.4932
$i=2$	0.2351
$i=3$	0.1732
$i=4$	0.1426
$i=5$	0.6694
$i=6$	0.3554
$i=7$	0.2580

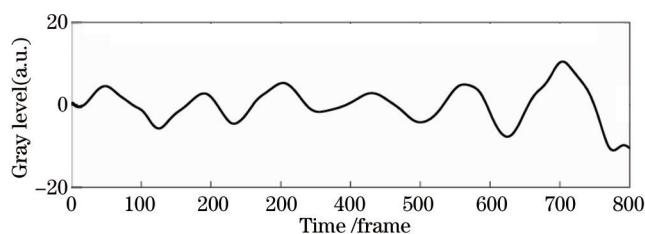


图 4 滤波后的信号 $S^{(4)}(t)$

Fig.4 Filtered signal $S^{(4)}(t)$

2.3 信号相位的解调

希尔伯特变换具有计算简单、效率高和自动执行等优点, 常被用于信号分析, 其定义如下^[4]:

$$H[u(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{u(\tau)}{t - \tau} d\tau, \quad (6)$$

另外, 在频域中, 希尔伯特变换还可以通过傅里叶变换来表示, 即

$$\mathcal{F}\{H[u(t)]\} = \mathcal{F}\left(\frac{1}{\pi t}\right) \cdot \mathcal{F}[u(t)] = -i \cdot \text{sgn}(\omega) \cdot U(\omega), \quad (7)$$

式中 $\mathcal{F}(\cdot)$ 代表傅里叶变换, ω 是频率, $\text{sgn}(\omega)$ 是符号函数。

如图 5 所示, 对于去除了背景强度信号, 希尔伯特变换可以被视为一种理想的 90° 相移器, 因此滤波后干涉信号的相位信息可由下式直接计算:

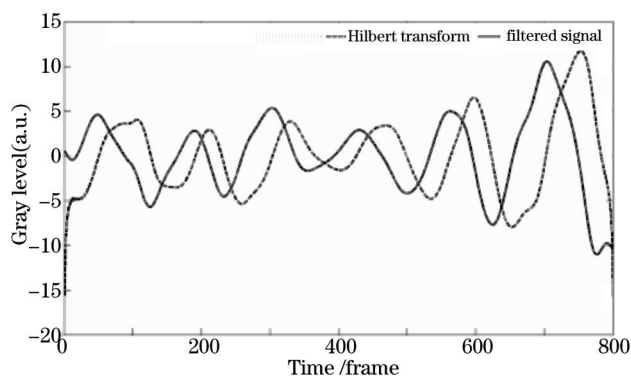


图 5 滤波后的信号及其希尔伯特变换

Fig.5 Filtered signal and its Hilbert transform

$$\psi_{\text{wrapped}}(t) = \arctan \left\{ \frac{H[S^{(k)}(t)]}{S^{(k)}(t)} \right\}. \quad (8)$$

图 6 显示了利用(8)式求得的信号 $[S^{(k)}(t)]$ 包裹在 $[-\pi, \pi]$ 的相位分布 $\psi_{\text{wrapped}}(t)$ 。经过时域解包裹处理即可获得连续的相位-时间关系曲线 $\psi_{\text{unwrapped}}(t)$ ^[15]。因此,从时刻 j 到时刻 i 的相位变化为

$$\Delta\alpha = \Delta\psi = \psi_{\text{unwrapped}}(j) - \psi_{\text{unwrapped}}(i), \quad (9)$$

当仅考虑离面形变时,相位变化与形变量的关系如下^[16]:

$$\Delta\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}(1 + \theta)Z, \quad (10)$$

式中 θ 为照明角度, λ 为照明光源波长。

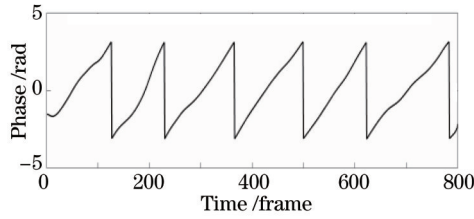


图 6 时域包裹相位图

Fig.6 Wrapped phase distribution in time domain

3 实 验

瞬态形变的测量光路如图 1 所示,激光器波长 532 nm,功率 3 W,且正入射照明,即 $\theta=0^\circ$ 。实验中采用美国 IDT 公司生产的 MotionPro HS-3 型相机,其像元尺寸为 12 μm ,分辨率为 1280 pixel \times 1024 pixel,全分辨率条件下的采集帧率可达 1000 frame/s。被测物为四周固定、直径约为 40 mm 的橡胶平板,中心处由压电陶瓷加载,加载量可由高压数字电源进行控制。分光棱镜尺寸为 25.4 mm,是限制成像视场的主要因素。物距为 500 mm,成像系统放大倍率 M 约为 0.3。在时域散斑干涉中,当干涉信号的调制强度较低时,基于希尔伯特变换的相位解调会收到干扰,而散斑尺寸和像元尺寸的相互关系则对调制强度有着很大的影响^[17]。当散斑和像元的尺寸接近时,各个像素点获得信号的调制强度较大;而当多个散斑覆盖同一像素点时,由于散斑之间的相位随机性会导致某些像素点的时域信号的调制强度大大降低,影响相位提取。但是,当像元尺寸为散斑尺寸的奇数倍时,低调制度点出现的概率会有所降低。因此,实验中选取焦距为 50 mm,光圈 F 数为 2.8 的成像镜头,这样既保证了成像所需的光强,又能使散斑尺寸 $\sigma = 1.22\lambda F(1 + M) \approx 2.37 \mu\text{m}$ 以尽量避免信号调制强度降低。

实验中,首先采集瞬态形变的散斑干涉图样序列,得到各个像素点的光强随时间变化的曲线 $I(t)$ 。其次,利用经验模态分解得到原信号的各阶本征模态函数 $I_{\text{IMF}_k}(t)$ 和代表了背景强度 $I_0(t)$ 的残余量 $r(t)$,并通过互相关系数 X_k 的计算得到包含噪声的 IMF 的最高阶数 k ,从而确定滤波后的信号 $S^{(k)}(t)$ 。然后,借助于希尔伯特变换的相移作用对信号 $S^{(k)}(t)$ 进行相位解调,并直接在时域中进行展开得到连续的相位分布 $\psi_{\text{unwrapped}}(t)$ 。最后,通过逐点分析来获取全场的相位分布,从而间接计算出形变量的大小。图 7(a)展示了形变中心处点(185,205)的原始信号。通过计算原信号与各阶 IMF 的互相关系数可知,该像素处含有噪声的 IMF 的最高阶数 $k=5$,即滤波后的重建信号可表示为 $S^{(5)}(t) = I_{\text{IMF}_6}(t) + I_{\text{IMF}_7}(t)$ 。图 7(b)和 7(c)展示了信号经过 EMD 滤波重建后的信号以及解调出的包裹相位信号。根据压电陶瓷的形变特性,本文选择用二次多项式拟合对形变数据进行分析,得到了该点的形变拟合曲线如图 8 所示,残差为 0.1198 μm ,形变大小为 1.8535 μm 。逐点进行时域相位分析之后可获得二维相位的分布,经空域均值滤波后如图 9 所示。图中只显示了被测物表面发生形变的区域,即 500 mm \times 500 mm。

由图 7 可知,橡胶板表面形变的最大速度为 2.3 $\mu\text{m/s}$,是一种以较低速度发生的瞬态形变。实验中,需要将采集的散斑图序列先暂时存储于相机内部,之后才能传输到上位机进行处理,这样就制约了测量形变的采集时间,使得系统的量程受到了一定的限制。

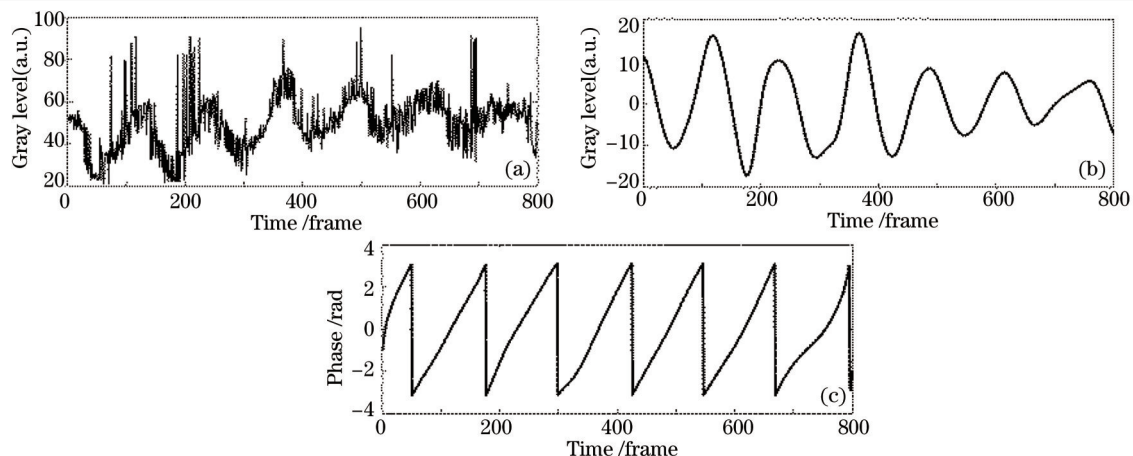


图7 形变中心处点(185,205)干涉信号的相位解调过程。(a)原始噪声信号;(b)利用EMD重建的信号 (c)包裹的相位-时间曲线

Fig.7 Phase extraction of the temporal interference signal at pixel (185,205)

(a) Noisy interference signal; (b) reconstructed signal by EMD; (c) wrapped phase-time curve

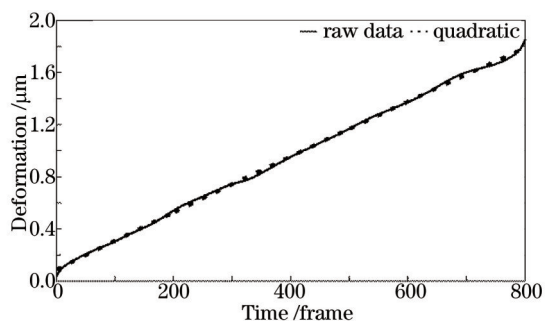


图8 点(185,205)的离面位移曲线及其二次多项式拟合结果

Fig.8 Out-of-plane deformation curve and its quadratic polynomial fitting at pixel (185,205)

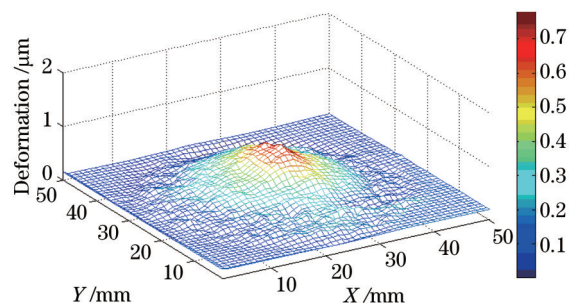


图9 ΔT 为0.35 s时的二维形变场

Fig.9 Two-dimensional deformation field when ΔT is 0.35 s

4 结 论

在迈克耳孙干涉光路基础上结合高速摄像系统,利用时域散斑干涉技术在 1000 frame/s 采集速度下实现了对被测物表面瞬态形变的动态测量。根据连续采集的散斑干涉图样序列得到了各个像素点的一维非平稳时域干涉信号。借助于互相关系数的计算筛选干涉信号通过经验模态分解所得的各阶本征模态函数,完成了信号变化趋势项的提取,消除了高频随机噪声和背景强度波动对相位提取所带来的干扰。利用希尔伯特变换的相移特性解调滤波重建信号的相位,并在时域中进行相位展开从而得到相位随时间的变化曲线。采用逐点分析的方式获得了全场的相位分布。对由压电陶瓷驱动的橡胶板瞬态形变进行了测量,实验结果表明该测量方法结构简单,易于实现,具有较高的时间和空间分辨率,适用于瞬态形变的测量。

参 考 文 献

- 1 P K Rastogi. Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques[M]. New York: John Wiley & Sons, 2001.
 - 2 Jonathan M Huntley, Guillermo H Kaufmann, David Kerr. Phase-shifted dynamic speckle pattern interferometry at 1 kHz[J]. Appl Opt, 1999, 38(31): 6556-6563.
 - 3 Baik SH, Park SK, Kim CJ, *et al.*. Two channel spatial phase shifting electronic speckle pattern interferometer[J]. Opt Commun, 2001,192(3): 205-211.
 - 4 Qian Kemao, Miu Hong, Wu Xiaoping. A real-time polarization phase shifting technique for dynamic measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(1): 64-67.
- 钱克矛, 缪泓, 伍小平. 一种用于动态过程测量的实时偏振相移方法[J]. 光学学报, 2001, 21(1): 64-67.

- 5 Zhu Meng, Li Xiangyu, Huang Zhanhua, *et al.*. Measurement of dynamic using speckle shearography with carrier frequency generated by double-aperture[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(7): 1701-1706.
朱 猛, 李翔宇, 黄战华, 等. 双孔载频剪切散斑干涉法测量表面动态形变[J]. 光学精密工程, 2013, 21(7): 1701-1706.
- 6 Zhu Meng, Huang Zhanhua, Li Xiangyu, *et al.*. Spatial carrier speckle interferometry technique research based on Fresnel bi-prism [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0912003 .
朱 猛, 黄战华, 李翔宇, 等. 菲涅耳双棱镜载频散斑干涉形变测量系统[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0912003.
- 7 C Joenathan, B Franze, P Haible, *et al.*. Speckle interferometry with temporal phase evaluation for measuring large-object deformation[J]. Appl Opt, 1998, 37(13): 2608-2614.
- 8 Tao Gang, Li Xide. Phase map retrieve with temporal speckle pattern interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(10): 1203-1207.
陶 刚, 李喜德. 时间序列散斑干涉场中相位函数的计算[J]. 光学学报, 2001, 21(10): 1203-1207.
- 9 Guillermo H Kaufmann, Gustavo E Galizzi. Phase measurement in temporal speckle pattern interferometry: comparison between the phase-shifting and the Fourier transform method[J]. Appl Opt, 2002, 41(34): 7254-7263.
- 10 Zhou Xiang, Zhao Hong. Three-dimensional profilometry based on Mexican Hat wavelet transform[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 197-202.
周 翔, 赵 宏. 基于 Mexican Hat 小波变换的三维轮廓术[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 197-202.
- 11 Lü Jie, Wang Ming, Huan Hai, *et al.*. Fringe analysis with Hilbert transform and its application in the measurement of aspheric mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(6): 781-785.
吕 捷, 王 鸣, 宦 海, 等. 希尔伯特变换条纹分析法及其在非球面镜测量上的应用[J]. 光学学报, 2005, 25(6): 781-785.
- 12 Wang Chenxing, Da Feipeng. Adaptive phase extraction method based on Hilbert-Huang transform[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1112006.
王辰星, 达飞鹏. 基于希尔伯特-黄变换的自适应相位提取法[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1112006.
- 13 Norden E Huang, Zhen Shen, Steven R Long, *et al.*. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Real Society, 1998, 454(1971): 903-995.
- 14 Ji Shujiao, Lei Yanmin. Stochastic Signal Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.
吉淑娇, 雷艳敏. 随机信号分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- 15 J M Huntley, H Saldner. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis[J]. Appl Opt, 1993, 32(17): 3047-3052.
- 16 Mohan NK, Saldner H, Molin NE. Electronic speckle pattern interferometry for simultaneous measurement of out-of-plane displacement and slope[J]. Opt Lett, 1993, 18(21): 1861-1863.
- 17 Charles Joenathan, Pascal Haible, Hans J Tiziani. Speckle interferometry with temporal phase evaluation: influence of decorrelation, speckle size, and nonlinearity of the camera[J]. Appl Opt, 1999, 38(7): 1169-1178.

栏目编辑: 何卓铭