

$\Phi 600$ mm 波长调谐干涉仪的振动误差抑制算法

郑东晖^{1*}, 陈磊¹, 马致遥¹, 李金鹏², 胡晨辉¹¹南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;²中科院南京天文仪器有限公司, 江苏 南京 210042

摘要 为抑制 $\Phi 600$ mm 波长调谐干涉仪测量过程中振动引起的测量误差, 研究了波长调谐振动抑制算法。该算法构建了基于波长调谐移相的振动理论模型, 在此基础上建立光强与初始相位的关系曲线, 从它的频谱中提取谐波系数用于修正初始相位, 解算出真实相位。引入评价参数误差抑制系数, 将该算法应用于 $\Phi 600$ mm 波长调谐平面移相干涉仪, 经过振动抑制算法的处理, 振动引起的二倍频“纹波”误差得到较好的抑制, 波面峰谷值由 0.1180λ 降至 0.0951λ (λ 为波长), 均方根值由 0.0164λ 降到 0.0135λ , 结果验证了振动抑制算法在波长调谐移相干涉仪上的有效性。

关键词 测量; 移相干涉; 波长调谐; 大口径干涉仪; 振动抑制

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2312005

Suppression Method for Vibration Error in $\Phi 600$ mm Wavelength-Tuning Interferometer

Zheng Donghui^{1*}, Chen Lei¹, Ma Zhiyao¹, Li Jinpeng², Hu Chenhui¹¹School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;²CAS Nanjing Astronomical Instruments Co. Ltd., Nanjing 210042, Jiangsu, China

Abstract To suppress the vibration-induced measurement error in the $\Phi 600$ mm wavelength-tuning interferometer, this paper presents a wavelength-tuning vibration suppression algorithm. In this algorithm, a theoretical vibration model based on wavelength-tuning phase shifting is constructed, and the relationship curve between the light intensity and the initial phase is established. The actual phase is retrieved after the initial phase is corrected by the harmonic coefficients extracted from the spectrum. The error suppression coefficient is introduced as an evaluation parameter. Furthermore, the algorithm is applied to a $\Phi 600$ mm wavelength-tuning phase-shifting plane interferometer, and the vibration-induced double-frequency "ripple" error is suppressed well by the algorithm. Specifically, the peak-to-valley (PV) value of the wavefront is decreased from 0.1180λ to 0.0951λ (λ is wavelength), and the root-mean-square (RMS) value is reduced from 0.0164λ to 0.0135λ . The above results verify the effectiveness of the proposed vibration suppression algorithm on wavelength-tuning phase-shifting interferometers.

Key words measurement; phase-shifting interference; wavelength tuning; large-aperture interferometer; vibration suppression

1 引言

移相干涉术以其高精度和高度自动化的特点, 在光学元件检测中得到应用广泛^[1-6]。传统移相干涉术中使用压电陶瓷 (PZT) 驱动参考镜位移实现移相, 但对于大口径干涉仪, 参考镜质量很大, PZT 难以产生足够的推力, 因此一般使用波长调谐移相方式^[7-8]。然

而, 由于大口径干涉仪的镜片质量大, 相应的吊装结构复杂, 稳定性不好。在这种情况下, 大口径干涉仪更容易受到外界振动的影响。

振动对于移相干涉术的主要影响是使得各幅移相干涉图之间的移相量成为随机变量。为解决这一问题, 研究者们提出了多种抗振技术。其中, 主动抗振移相干涉技术^[9]和空域移相干涉技术^[10-11]所使用的硬件

收稿日期: 2022-06-02; 修回日期: 2022-07-06; 录用日期: 2022-07-28

基金项目: 江苏省自然科学基金 (BK20200458)、国家自然科学基金 (62005122)

通信作者: *zdonghui@njjust.edu.cn

结构相对复杂。相对地,各种抗振算法则不需要改变仪器的硬件结构,能够更直接地应用于各种移相干涉仪中。这些算法可以分为三类:1)误差不敏感 N 步移相算法,这类算法对于低频振动有抑制作用,如 de Groot^[12]提出的七步法对于一倍移相频率以下的振动不敏感;2)迭代法^[13-14],如王朝阳等提出的方法,这类方法将移相量作为未知变量与被测相位同时进行求解,适用于包括振动在内的多种形式的移相误差,但迭代运算的收敛性和计算复杂度不易控制;3)振动补偿类算法,这类算法能够从含有振动误差的信号中提取相位信息,抑制振动信息,避免迭代运算。Huntley^[15]将时变信号中三次谐波中的误差信息提取出来,用于校正基频信号中的有用信号,但是该方法对大于 0.1 rad 振幅的振动抑制效果不明显;Milman^[16]从最小二乘法解算相位的原理出发,提出优化系数矩阵的参数来抑制振动给测量带来的误差,但是该方法只对小范围振动频率的振动抑制得很好,其他频率的振动带来的误差反而有可能增大;Park 等^[17]使用 PZT 连续驱动参考镜得到每个像素的时变信号,通过分析该信号的频谱就可以分离振动误差,但是 PZT 只能作为小口径测量的驱动器。Deck^[18]提出的振动抑制算法对干涉图的限制条件很少(仅要求干涉图中有一根以上的条纹)、对干涉仪硬件要求不高、求解精度高,因此该算法具有较好的实用性。然而,Deck 等仅在小口径 PZT 移相干涉仪上使用了抑制算法,由于大口径波长调谐移相干涉仪在硬件特性与移相原理上与小口径 PZT 移相干涉仪有显著区别,振动抑制算法在大口径波长调谐移相干涉仪中的应用缺乏实验依据,因此,本文将研究振动抑制算法在大口径波长调谐移相干涉仪上的工作性能。

2 基本原理

2.1 $\Phi 600$ mm 平面干涉仪测量过程中的振动

大口径干涉仪采用波长调谐移相方式,CCD 接收到的光强信号可以写成

$$I_r(x, y) = I_0(x, y) \{ 1 + V(x, y) \cos [\varphi(x, y) + \psi_r + \epsilon_r] \}, r = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

式中: I_0 为入射光强; V 为调制度; φ 为待测相位; ψ_r 为移相量; ϵ_r 为第 r 帧的移相误差; N 为移相干涉图总数。考虑面形偏差远小于腔长的情形下,待测相位以及移相量的表达式如下:

$$\begin{cases} \varphi = \frac{4\pi}{\lambda} L(x, y) \\ \psi_r = 4\pi \left(\frac{1}{\lambda + \Delta\lambda} - \frac{1}{\lambda} \right) L \approx \frac{4\pi}{\lambda^2} \Delta\lambda L \end{cases}, \quad (2)$$

式中: L 为腔长; $\Delta\lambda$ 为波长改变量。腔长 L 测定之后,可设定式(2)中波长改变量 $\Delta\lambda$,使得 $\psi_r = 2m\pi(r-1)/N$,在没有振动并且不考虑波长调谐分辨

率限制的情况下($\epsilon_r = 0$),待测相位可以用传统移相算法(PSI)解算。

如果在 CCD 采集干涉图的过程中存在振动,并只考虑镜片沿光轴方向的移动,即改变腔长,设定第 r 帧的腔长改变量为 ΔL_r ,则根据式(2),瞬时待测相位以及移相量分别为

$$\begin{cases} \varphi'_r = \varphi + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta L_r \\ \psi'_r = \psi_r + \frac{4\pi}{\lambda^2} \Delta\lambda \Delta L_r \end{cases}. \quad (3)$$

对于大口径干涉仪,工作腔长 L 通常大于 100 mm,对于中心波长为 632.8 nm 的激光器,并且移相量为 $\pi/2$,此时对应的波长调谐量小于 5×10^{-4} nm。若 $\Delta L_r = 30$ nm,实际待测相位与实际移相量分别为

$$\begin{cases} \varphi'_r \approx \varphi + \pi/5 \\ \psi'_r - 1.5 \times 10^{-7} \pi < \psi'_r < \psi_r + 1.5 \times 10^{-7} \pi \end{cases}. \quad (4)$$

从式(4)可以看出:当腔长大于 100 mm 时,实际移相量 ψ'_r 与理想移相量 ψ_r 相差仅为 $1.5 \times 10^{-7} \pi$,因此波长调谐导致的移相误差可以忽略;但是,实际待测相位 φ'_r 与理想相位 φ 差异很大,镜子沿轴移动 30 nm 的距离,就会引入 $\pi/5$ 的相位误差,所以式(1)中振动引入的移相误差 ϵ_r 为

$$\epsilon_r = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta L_r. \quad (5)$$

考虑测量过程中存在振动,如果已知每帧的移相误差 ϵ_r ,测量误差 $\Delta\varphi$ ^[19] 的表达式为

$$\Delta\varphi = \arctan \frac{\sum_{r=1}^N \Delta L_r - C \cos 2\varphi - S \sin 2\varphi}{\frac{\lambda N}{4\pi} - C \cos 2\varphi + S \sin 2\varphi}, \quad (6)$$

式中: $C = \sum_{r=1}^N \Delta L_r \cos 2\psi_r$; $S = \sum_{r=1}^N \Delta L_r \sin 2\psi_r$ 。

2.2 基于 $\Phi 600$ mm 平面干涉仪的振动抑制算法

为了消除额外移相引入的测量误差,采用振动抑制算法校正含有移相误差的待测相位,最终解算出原始相位,算法的主要过程如下。

1) PSI 求解初始相位

当存在未知移相量 ϵ_r 时,假设此时的光强信号为 I'_r ,利用传统 PSI 可以得到携带误差的初始相位分布 φ' :

$$\varphi'(x, y) = \arctan \frac{\sum_{r=1}^N I'_r(x, y) \sin \psi_r}{\sum_{r=1}^N I'_r(x, y) \cos \psi_r}. \quad (7)$$

2) 建立光强与初始相位分布的关系

将求得的初始相位与对应的光强建立一一对应关系,并画出光强-相位(I - P)分布曲线,如图 1 所示。当没有振动存在时,光强与相位的关系曲线为一理想正弦曲线;而当振动存在时,该正弦曲线发生“畸变”。

该“畸变”曲线的解析表达式^[18]如下:

$$c(\varphi', t) = \frac{I_0 V}{2} \left\{ \exp[i\beta(t)] \left[\sum_{k=0}^{\infty} g_k \exp[i(2k+1)\varphi'] - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\bar{g}_k \exp[-i(2k-1)\varphi']}{2k-1} \right] + \exp[-i\beta(t)] \left[\sum_{k=0}^{\infty} \bar{g}_k \exp[-i(2k+1)\varphi'] - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{g_k \exp[i(2k-1)\varphi']}{2k-1} \right] \right\}, \quad (8)$$

式中: g_k 为谐波系数, \bar{g}_k 为 g_k 的共轭, $g_k \approx -(2k-1)\bar{g}_{-k}$; φ' 为由式(7)确定的携带误差的初始相位分布; t 为时间; $\beta(t)$ 为随时间变化的移相量, 包含调谐波长引入的移相量以及振动引入的移相量, 可表示为

$$\beta(t) = \frac{4\pi}{\lambda^2} L f_{\Delta\lambda} t + \frac{4\pi}{\lambda} \Gamma \cos(\omega_v t + \alpha), \quad (9)$$

式中: $f_{\Delta\lambda}$ 为波长调谐频率; Γ 为振动的最大振幅; ω_v 为振动频率; α 为振动初相位。

3) 求解谐波系数校正相位分布

为了校正初始相位, 对式(8)进行傅里叶变换:

$$C(K, t) = \int_{-\infty}^{\infty} c(\varphi', t) \exp(-iK\varphi') d\varphi', \quad (10)$$

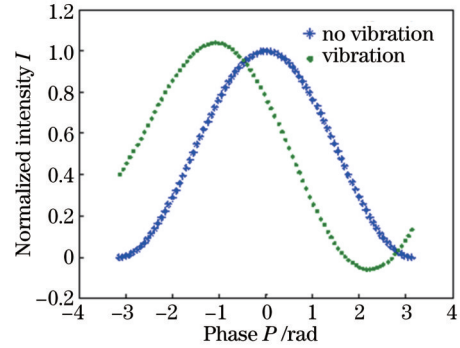


图 1 I-P 曲线

Fig. 1 I-P curves

可得

$$c(K, t) = \frac{I_0 V}{2} \left\{ \exp[i\beta(t)] \left[\sum_{k=0}^{\infty} g_k \delta(K-2k-1) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\bar{g}_k \delta(K+2k-1)}{2k-1} \right] + \exp[-i\beta(t)] \left[\sum_{k=0}^{\infty} \bar{g}_k \delta(K+2k+1) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{g_k \delta(K-2k+1)}{2k-1} \right] \right\}, \quad (11)$$

式中: $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数; K 为整数。要想求出谐波系数 g_k , 就必须先求出 $\beta(t)$, 按照式(12)可以实现 $\beta(t)$ 的近似求解:

$$\text{Im} \left[\sum_{k=0}^{\kappa} C(2k+1, t) \exp[-i(2k+1)\beta(t)] \frac{-\frac{1}{2}}{\left(k-\frac{1}{2}\right)! 2^k} \right] = 0, \quad (12)$$

式(12)中, κ 一般取 3。I-P 曲线的傅里叶变换谱中, 峰值处的复数值为两个谐波系数的线性叠加:

$$C(2k+1, t) = g_k \exp[i\beta(t)] - \frac{g_{k+1}}{2k+1} \exp[-i\beta(t)]. \quad (13)$$

利用式(13)可求得各谐波系数值, 最后根据式(14)完成对原始相位的修正^[18]:

$$\exp[i\varphi(x, y)] = \sum_{k=0}^{\infty} g_k \exp[i(2k+1)\varphi'(x, y)] - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\bar{g}_k \exp[i(2k+1)\varphi'(x, y)]}{2k-1}. \quad (14)$$

3 仿 真

Φ600 mm 平面干涉仪条纹振动特点为频率为中低频, 振动幅度较大。本文利用 Zernike 多项式构造波面, 并依据此波面以及单频振动函数给出移相干涉图, 再根据振动抑制算法计算原始相位。将求得的波面数据与已知波面相比较, 可验证波长调谐振动抑制算法的正确性。

利用 Zernike 前 6 项多项式构造波面, 其系数如表 1 所示, 由于 Zernike 构造的是单位圆中的波面, 所以 $0 < \rho < 1$, ρ 为归一化极坐标。根据式(1)构造干涉图, 仿真中设定 $I_0 = 0.5$, $V = 1$, 初始相位 φ 为 Zernike 多项式构造的相位, 换算为直角坐标系下的表达式为

$$\varphi = 0.2 + 16x + 0.2[2(x^2 + y^2) - 1] + 0.1(x^2 - y^2) + 0.14(2xy). \quad (15)$$

表 1 仿真波面各项 Zernike 系数

Table 1 Zernike coefficients of simulation wavefront

Zernike polynomial	Meaning	Zernike coefficient Z_i
1	Piston	0.20
$\rho \cos \theta$	Tilt about x -axis	16.00
$\rho \sin \theta$	Tilt about y -axis	0
$2\rho^2 - 1$	Focus	0.20
$\rho^2 \cos 2\theta$	Astigmatism at 0°	0.10
$\rho^2 \sin 2\theta$	Astigmatism at 45°	0.14

干涉图移相角频率设定为归一化频率 1, 振动频率为 1, 振幅 $\varepsilon = \pi/7$, 初始振动相位 $\alpha = 0.1$ rad, 仿真得到的干涉图序列如图 2 所示。

图 2(a)~(d) 分别对应 t 为 0、0.25 s、0.50 s、0.75 s 时刻的干涉图, 理想情况下对应的移相量为 0 、 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$, 实际上有振动的存在, 此时移相量为 0.45 rad、1.53 rad、2.69 rad、5.16 rad。基于模拟干涉图序列, 分别使用 PSI 算法、振动抑制算法求解干涉图相位, 并与已知相位进行比较。图 3 为 PSI 求得的相位与对应的光强关系, 即 I - P 曲线。

图 4(a) 为设定的相位分布, 图 4(b) 为利用 PSI 计算得到的相位分布, 图 4(c) 为利用振动抑制算法修正得到的相位分布。设定相位分布的峰谷 (PV) 值为 0.0908λ , RMS 值为 0.01351λ ; PSI 计算得到的相位分布 PV 值为 0.1054λ , RMS 值为 0.02220λ ; 振动抑制算法得到的相位分布 PV 值为 0.0912λ , RMS 为 0.01351λ 。从图 4 中不难看出, 利用 PSI 计算得到的相位分布受到移相不准的影响, 在相位真值上叠加了一组“波纹”, 通过振动抑制算法的修正, 该波纹消失。

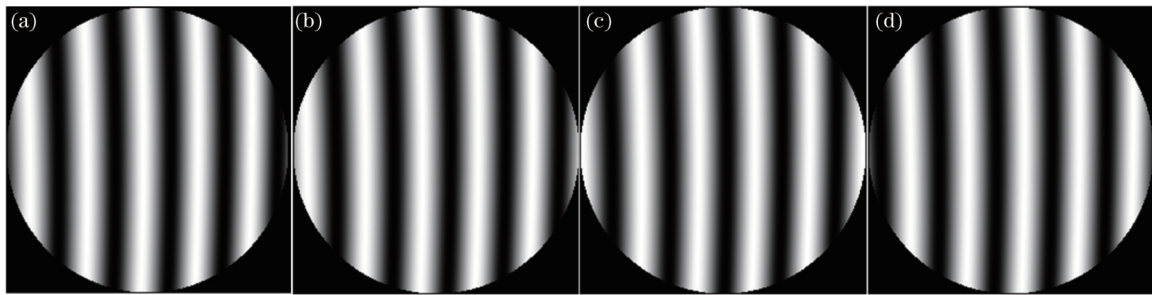


图 2 仿真移相干涉图。(a) 移相量为 $\pi/2$; (b) 移相量为 π ; (c) 移相量为 $3\pi/2$; (d) 移相量为 2π

Fig. 2 Simulation phase-shifting interferograms. (a) Phase-shift of $\pi/2$; (b) phase-shift of π ; (c) phase-shift of $3\pi/2$; (d) phase-shift of 2π

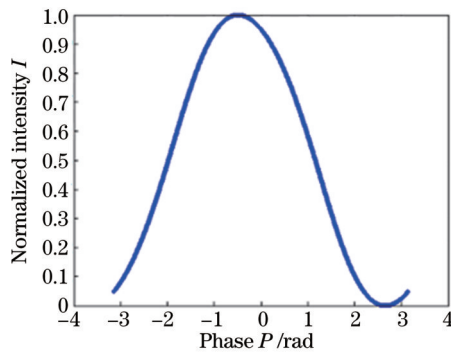


图 3 仿真 I - P 曲线

Fig. 3 Simulated I - P curve

为了定量研究振动抑制算法对振动的抑制效果, 引入评价参数误差抑制系数 (ESC):

$$C_{ES} = \frac{\text{Std}|\varphi_E(x, y) - \varphi(x, y)|}{\text{Std}|\varphi_C(x, y) - \varphi(x, y)|}, \quad (16)$$

式中: φ_E 为抑制前的解调相位; φ 为原始相位; φ_C 为补偿后的解调相位; $\text{Std}|\cdot|$ 表示求取标准差。分别计算出振动抑制算法、PSI 相对于原始相位的分布, 并且求取均方根值, 计算两者之间的比值。对于图 2 的模拟干

涉序列, ESC 达到了 17。

此外, 为研究振动抑制算法对不同频率、不同振幅周期性振动的抑制效果, 设置不同频率、不同幅度的振动, 并计算 ESC, 结果如表 2、3 所示。由表 2、3 可知, 振动抑制算法对不同频率、不同幅度的振动都有很好的抑制效果。表 2 中 ω 表示振动频率, ω_0 表示移相频率。当振动频率为移相频率的 2 倍时, 振动抑制算法的抑制效果最弱, 并且当将振动频率设定为采样频率的 4 倍时, PSI 计算得到的相位不受振动影响, 这与 de Groot^[20] 讨论的结果完全一致。

4 实 验

图 5 为南京理工大学研制的 $\Phi 600$ mm 波长调谐平面干涉仪。激光经过扩束准直, 经参考镜以及测试镜的反射, 形成干涉图, 并被 CCD 接收, 最后由计算机解算相位。激光器采用美国 New Focus 可调谐激光器, 它的中心波长为 632.8 nm, 其调谐范围为 0.25 nm, 调谐精度为 6.7×10^{-7} nm。利用计算机的输出信号控制高精度稳压电源, 使其输出相应的电压到可调谐激光器, 此时波长发生变化, 相当于在参考波面与测试波面件引入一个已知移相量。

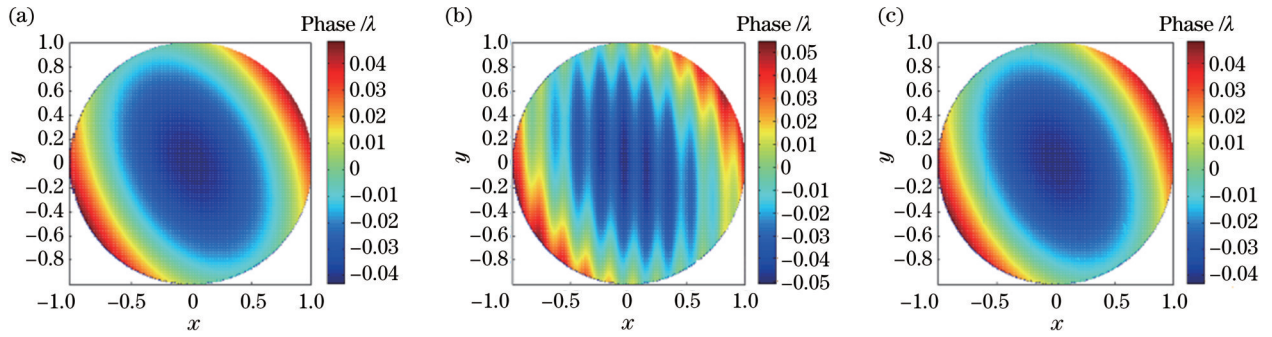


图 4 仿真结果。(a)预设相位;(b)PSI计算结果;(c)振动抑制算法计算结果

Fig. 4 Simulation results. (a) Initial phase; (b) result of PSI; (c) calculation result of vibration suppression method

表 2 不同频率下的振动抑制效果

Table 2 Vibration suppression effects under different frequencies

ω_v/ω_0	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0
ESC	277	17	12	17	17

表 3 不同幅度下的振动抑制效果(振动频率为 2 倍的移相频率)

Table 3 Vibration suppression effects under different amplitudes (vibration frequency is 2 times the phase shift frequency)

ϵ/rad	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0
ESC	7.6	12.0	19.0	26.0	34.0

在腔长 $h=475\text{ mm}$ 条件下对空腔进行测试,根据式(2)设定波长改变量分别为 $0, 1.054 \times 10^{-4}, 2.107 \times 10^{-4}, 3.161 \times 10^{-4}\text{ nm}$, 此时波长改变引入的移相量为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 。干涉仪放置在隔振平台上,关闭气浮,引入地面传递的振动,实际采集到的干涉图序列如

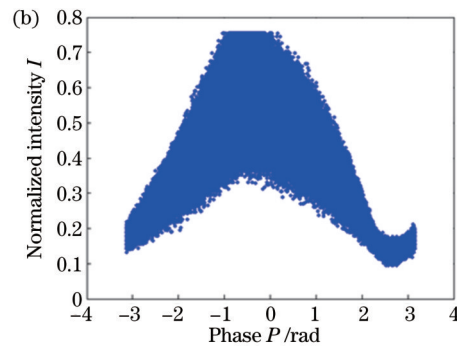
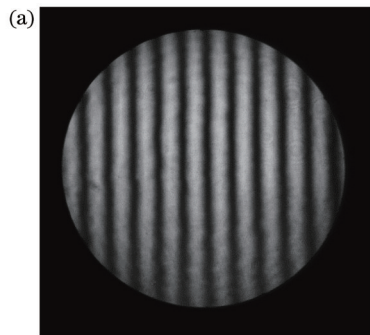


图 6 实验数据。(a)其中一帧干涉图;(b) I-P 图

Fig. 6 Experimental data. (a) One of interferograms; (b) I-P figure

图 7(a)、(b)分别为 PSI 解算出的相位以及振动抑制算法解算出的相位。PSI 计算出的相位分布 PV 值为 0.1180λ , RMS 值为 0.0164λ ; 振动抑制算法计算出的相位分布 PV 值为 0.0951λ , RMS 值为 0.0135λ 。

由图 7 可知,振动抑制算法可以从很大程度上抑制振动对测量的影响,相对于图 7(a),图 7(b)所示的相位分布中,波纹效应有很大的改善。振动抑制算法的理论前提是背景光强均匀,但是大口径干涉仪由于



图 5 $\Phi 600\text{ mm}$ 平面干涉仪装置图

Fig. 5 Experimental setup of $\Phi 600\text{ mm}$ plane interferometer

图 6(a)所示。图 6(b)为 PSI 计算得到的相位与对应光强之间的关系曲线,即 I-P 曲线。由 I-P 曲线可知,相位值与光强值不是一一对应关系,说明背景光强不够均匀,一个相位值可能对应多个光强值。

扩束较大,很难实现均匀光强,这时不可避免地会降低振动抑制算法解算相位的精度。下一节将抑制前和抑制后的相位数据与标准相位进行比较,并讨论光强不均匀对算法性能的影响。

5 分析与讨论

5.1 振动抑制算法的抑制效果

为了研究振动抑制算法的抑制效果,在夜间进行

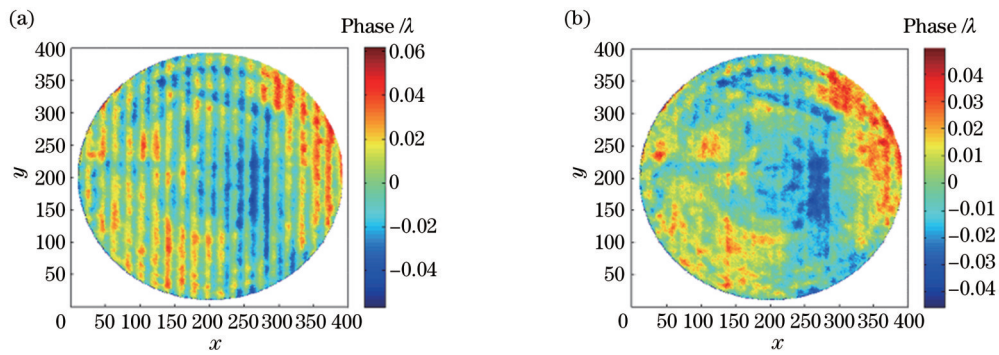


图 7 实验结果。(a) PSI 计算得到的相位分布;(b) 振动抑制算法计算得到的相位分布

Fig. 7 Experimental results. (a) Phase calculated by PSI; (b) phase calculated by vibration suppression method

精度测试,并利用传统 PSI 解算出不受振动影响的标准相位。标准相位分布如图 8(a)所示,标准相位的 PV 值为 0.09430λ ,RMS 值为 0.01360λ 。

标准相位与 PSI 计算得到的相位之差的 RMS 值

为 0.0103λ ,标准相位与振动抑制算法计算得到的相位之差的 RMS 值为 0.0035λ 。从图 8(b)、(c)上看,PSI 与标准相位之差是明显的波纹分布,经过振动抑制算法的校正,该波纹有明显的改善。

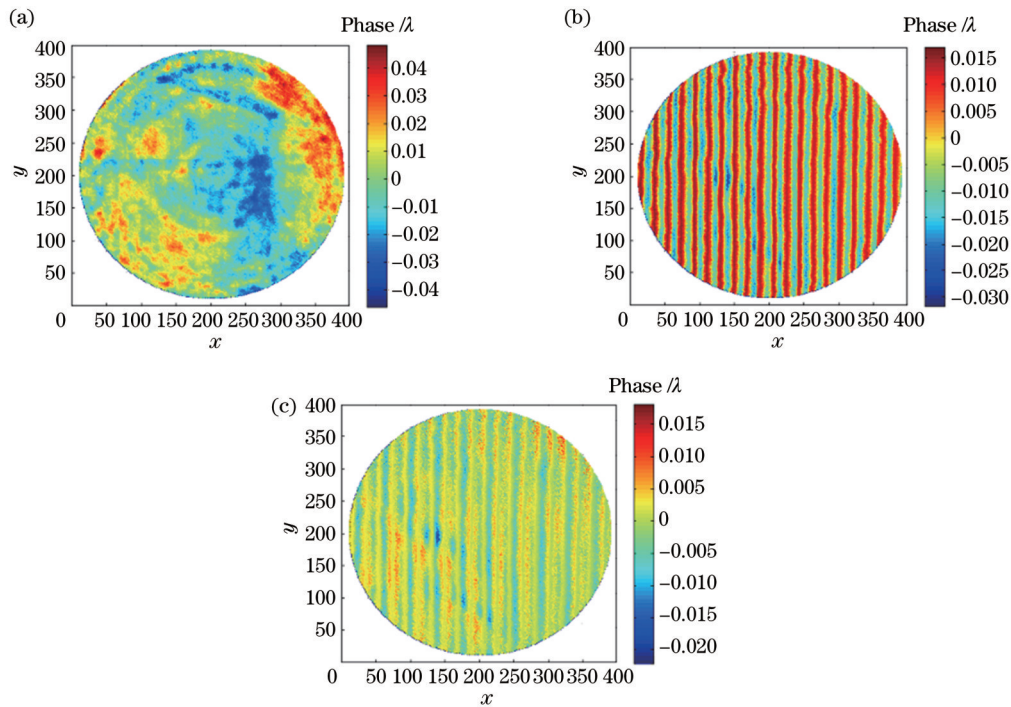


图 8 振动抑制算法效果。(a) 标准相位分布;(b) 振动情况下的 PSI 解算偏差;(c) 振动抑制算法解算偏差

Fig. 8 Effect of vibration suppression method. (a) Standard phase distribution; (b) deviation of PSI under vibration; (c) deviation of vibration suppression method

5.2 光强不均匀的影响

$\Phi 600$ mm 平面干涉仪扩束程度较大,不可避免地出现背景光强不均匀的问题。为讨论光强不均匀对振动抑制算法的影响,构造非均匀干涉图:

$$I_j(x, y) = R(x, y) [A + B \cos(\phi + \delta_j)], \quad (17)$$

式中: $R(x, y) = \exp[-\gamma(x^2 + y^2)]$ 为非均匀系数, γ 为非均匀性调制参数,通过调整 γ 的值可以控制非均匀的程度,定义干涉图边缘与中心的局部最大光强比值为非均匀等级; A 为背景分量; B 为调制度分量; δ_j 为移相量。

由图 9(a)可以看出,在非均匀干涉图中,随着非均匀等级的减小,振动抑制算法的性能降低。图 9(b)显示了造成这一现象的原因:在干涉图非均匀的情况下,相位误差图的曲线对于每个相位值呈现明显的多值函数特点,使后续计算结果产生误差。此外,干涉图均匀性较差时,也会造成振动抑制算法的补偿效果变差。图 9(c)显示了非均匀条件下补偿后的解调相位与理想相位的差值,虽然振动引入的误差得到了大幅抑制,但仍然有残留波纹留在了补偿后的波面分布上。这就证实了实测相位由于受到光强不均匀的影响,仍

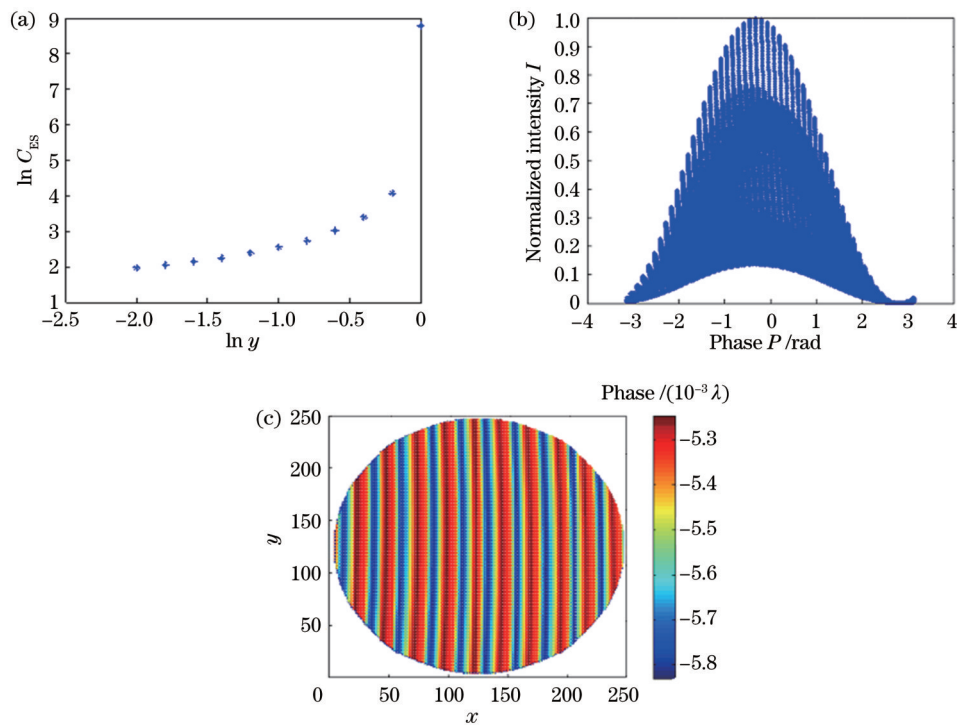


图9 非均匀干涉图抑制效果。(a)不同非均匀度下的振动抑制效果;(b)其中一幅干涉图的 I - P 曲线;(c)振动抑制算法结果残差
Fig. 9 Suppression effect for nonuniformity interferograms. (a) Suppression effects under different nonuniformity; (b) I - P for one of interferogram; (c) residual error of vibration suppression method

然有残留波纹存留在波面上,如图9(c)所示。

6 结 论

针对大口径波长移相干涉仪在测量过程中受到振动影响这一问题,采用了波长调谐振动抑制算法来抑制振动带来的测量误差。实验结果均表明,振动补偿算法可以有效抑制干涉仪中经常出现的中低频,较大幅度的振动引入二倍频“纹波”误差。该方法不需要迭代,不需要多帧干涉图处理,计算速度快。但是,振动抑制算法的性能会受到光强不均匀性的影响,研究能够在光强不均匀条件下修正初始相位的算法、提高其抗振性能是下一步工作的主要内容。

参 考 文 献

- [1] 季文,袁群,高志山,等.基于多波长干涉技术的拼接镜共相检测[J].光学学报,2021,41(16):1612003.
Ji W, Yuan Q, Gao Z S, et al. Co-phasing detecting for segmented mirror based on multiple wavelength interferometry [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(16): 1612003.
- [2] 尹智瑶,郭仁慧,杨鑫,等.基于白光干涉的ICF靶丸表面缺陷测量方法[J].光学学报,2022,42(10):1012004.
Yin Z Y, Guo R H, Yang X, et al. Measurement method for surface defects on ICF capsules based on white light interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(10): 1012004.
- [3] 叶明哲,王劲博,胡遥,等.大梯度相位单幅干涉图的解相方法[J].中国激光,2019,46(5):0504002.
Ye M Z, Wang S P, Hu Y, et al. Phase retrieval methods for single interferogram with large gradient phase[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0504002.
- [4] 路文文,郭景阳,陈善勇.鸥翼型非球面元件的白光干涉拼接测量[J].光学学报,2022,42(9):0912001.
Lu W W, Guo J Y, Chen S Y. White light interferometry stitching measurement of gull-wing aspheric optics[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(9): 0912001.
- [5] 陈强华,周胜,丁锦红,等.基于多步相移法和偏振干涉光学层析光路的三维温度场测量[J].光学学报,2022,42(7):0712004.
Chen Q H, Zhou S, Ding J H, et al. Three-dimensional temperature field measurement based on multi-step phase shift method and polarization interference optical tomography optical path[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 0712004.
- [6] 毕书贤,段明亮,宗毅,等.高精度动态白光干涉测量方法[J].光学学报,2022,42(5):0512002.
Bi S X, Duan M L, Zong Y, et al. High-precision dynamic white-light interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(5): 0512002.
- [7] Oreb B F, Farrant D I, Walsh C J, et al. Calibration of a 300-mm-aperture phase-shifting Fizeau interferometer[J]. Applied Optics, 2000, 39(28): 5161-5171.
- [8] 郭仁慧,李建欣,朱日宏,等.波长调谐随机移相算法的研究[J].中国激光,2012,39(5):194-199.
Guo R H, Li J X, Zhu R H, et al. Research on the randomly phase shifting algorithm with wavelength tuning[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(5): 194-199.
- [9] Zhao C, Burge J H. Vibration-compensated interferometer for surface metrology[J]. Applied Optics, 2001, 40(34): 6215-6222.
- [10] Kihm H, Kim S W. Fiber-diffraction interferometer for vibration desensitization[J]. Optics Letters, 2005, 30(16): 2059-2061.
- [11] 吕鑫,王道档,阮畅,等.用于瞬态微观轮廓检测的Mirau偏振干涉显微镜[J].仪器仪表学报,2022,43(2):92-99.
Lü X, Wang D D, Ruan Y, et al. Polarization Mirau interference microscope for transient microscopic testing[J].

- Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 92-99.
- [12] de Groot P. Derivation of algorithms for phase-shifting interferometry using the concept of a data-sampling window[J]. Applied Optics, 1995, 34(22): 4723-4730.
- [13] Wang Z Y, Han B T. Advanced iterative algorithm for phase extraction of randomly phase-shifted interferograms[J]. Optics Letters, 2004, 29(14): 1671-1673.
- [14] Okada K, Sato A, Tsujiuchi J. Simultaneous calculation of phase distribution and scanning phase shift in phase shifting interferometry[J]. Optics Communications, 1991, 84(3/4): 118-124.
- [15] Huntley J M. Suppression of phase errors from vibration in phase-shifting interferometry[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1998, 15(8): 2233-2241.
- [16] Milman M. Optimization approach to the suppression of vibration errors in phase-shifting interferometry[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2002, 19(5): 992-1004.
- [17] Park J, Kim S W. Vibration-desensitized interferometer by continuous phase shifting with high-speed fringe capturing[J]. Optics Letters, 2010, 35(1): 19-21.
- [18] Deck L L. Suppressing phase errors from vibration in phase-shifting interferometry[J]. Applied Optics, 2009, 48(20): 3948-3960.
- [19] Schwider J, Burow R, Elssner K E, et al. Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources[J]. Applied Optics, 1983, 22(21): 3421-3432.
- [20] de Groot P J. Vibration in phase-shifting interferometry[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1995, 12(2): 354-365.