

基于载频交叠重构干涉术的大口径干涉仪 相移误差校正方法

李金鹏 陈 磊 李 博 朱荣刚 李建欣

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要 为抑制 $\Phi 600$ mm 相移式菲佐干涉仪中波长调谐误差以及振动带来的测量误差, 提出了一种可用于波长调谐移相干涉仪的误差校正方法。将 4 幅载频干涉图按列交叠重构得到时空条纹图, 由于载频的存在实现了误差谱与相位谱的分离, 提取相位谱就可以正确解包相位。存在波长调谐误差和振动的情况下, 仿真结果表明利用载频交叠重构干涉术, 相位恢复精度是传统移相算法精度的 10 倍以上; 实验结果显示, 载频交叠重构干涉术的测量精度为 0.0066λ 。利用载频交叠重构干涉术能够有效抑制 $\Phi 600$ 干涉仪中波长调谐误差与振动造成的测量误差。

关键词 测量; 光学测量; 波长调谐移相技术; $\Phi 600$ 干涉仪; 相移误差

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0312003

Method Based on Carrier Squeezing Interferometry for Suppressing Phase Errors from Inaccurate Phase Shift in a $\Phi 600$ Fizeau Interferometer

Li Jinpeng Chen Lei Li Bo Zhu Ronggang Li Jianxin

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract A method using in a phase-shifting $\Phi 600$ Fizeau interferometer is proposed to suppress phase errors from inaccurate wavelength increment and vibration. The data of four interferograms are reconstructed by column and combined to a single spatial-temporal fringes (STF) image. In the spectrum of the STF, the phase lobe and error lobe are separated by introducing linear carrier into original interferograms. The component related to phase distribution can be selected by filtering and the phase can be reconstructed accurately. Considering vibration and inaccurate wavelength increment, the simulation result indicates that the accuracy using this method is 10 times of that using traditional phase shifting-algorithm. Its validation is verified by experiments, where an accuracy of 0.0066λ is obtained. This method can be used to realize suppression of phase errors from inaccurate wavelength increment and vibration in a $\Phi 600$ Fizeau interferometer.

Key words measurement; optical measurement; wavelength tuning phase-shifting technique; $\Phi 600$ Fizeau interferometer; inaccurate phase shift

OCIS codes 120.2650; 120.3180; 120.5050; 120.7280

1 引 言

移相干涉术(PSI)通过分析一组具有固定移相量的干涉图确定被测件的面形。考虑到大口径光学标准平晶惯性过大, 无法通过机械平移实现高频率的相移调制, 目前国际上口径达到 $\Phi 600$ mm 的相移式菲佐干涉仪(以下简称为 $\Phi 600$ 干涉仪)一般采用调谐激

光光源波长的方式移相^[1~3]。在理想情况下移相量恒为 $\pi/2$, 然而 $\Phi 600$ 干涉仪测量过程中存在相移误差, 使得移相量不恒为 $\pi/2$ 导致测量精度下降。

干涉仪中存在的相移误差大致分为两种: 移相器移相不准^[4]以及环境振动^[5]。为了抑制相移误差, 研究者在传统干涉仪基础上提出了相移误差抑

收稿日期: 2012-11-02; 收到修改稿日期: 2012-11-16

基金项目: 国家自然科学基金(61108041, U1231111)资助课题。

作者简介: 李金鹏(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事光学测试技术方面的研究。E-mail: kingpenglee@yahoo.cn

导师简介: 陈 磊(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学测试技术方面的研究。E-mail: chenlei@njjust.edu.cn

制方案。针对移相不准导致的测量误差, Schmit 等^[6]在传统 3 帧法以及 4 帧法基础上推导出新的 5 帧算法以及 6 帧算法, 朱日宏等^[7]采用重叠 4 步平均法校正位移式移相器的标定误差与非线性误差; Okada^[8]将移相量考虑成随机值, 采用最小二乘迭代法求取相位分布; Wang 等^[9]做出改进, 提高了迭代效率并且不用限定迭代的初始移相量取值, 郭仁慧等^[10]提出基于波长调谐干涉仪的迭代算法, 并将该技术应用到 $\Phi 600$ 干涉仪中。针对振动导致的测量误差, 动态干涉术显示了很好的抗震性能^[11,12], 但由于系统复杂, 不易在 $\Phi 600$ 干涉仪中实现。不少研究者在 PSI 基础上提出了一系列的抗震算法, Groot 通过采集 N 幅干涉图并采用 N 步移相算法, 实现了对振动的抑制^[13]; Huntley^[14]提取振动引入的 3 次谐波相位误差校正基频待求相位分布; Deck^[15]则根据“相位误差曲线”的谐波系数校正受到振动干扰的相位信息; Hao 等^[16]在振动存在的环境下连续驱动压电陶瓷 (PZT), 简单求解每幅干涉图相位分布的平均值得到真实相位分布; Park 等^[17]采集了大量含有振动信息的干涉图, 并利用每个像素的连续信号频谱解算初始相位, 王明等^[18]同样采集了一系列连续移相干涉图, 提出时频域双重分析法精确恢复相位; Vargas 等^[19]将受振动影响的移相量考虑成相移平面, 在使用傅里叶变换方法确定相移平面之后, 利用最小二乘法求解相位分布; Broistedt 等^[20]利用 3 个探测器实时确定干涉图采集时的瞬时相移平面, 同样确定了消除振动影响的相位分布。

Li 等^[21]提出了载频交叠重构干涉术 (CSF) 用以抑制 PZT 移相不准以及振动带来的测量误差, 该技术不假定相移误差的具体形式, 适用于抑制多种相移误差。 $\Phi 600$ 干涉仪采用波长调谐的移相方式, 在长腔长条件下波长调谐的分辨率有限, 导致移相不准引入测量误差; 抗振平台能够大幅度隔离来自地面的振动, 但由于口径过大更易受到通过空气传播的振动。本文将基于 CSI 针对这两种相移误差开展进一步研究, 给出了波长调谐误差以及振动的解析形式, 介绍了利用 CSI 抑制这两种误差的原理。针对实验中采用激光器的参数仿真波长调谐误差, 并仿真实验环境下可能存在的振动, 分别利用 CSI 与传统移相算法进行相位恢复精度的对比研究。将 CSI 应用到 $\Phi 600$ 干涉仪中, 并对 CSI 可能影响相位恢复精度的因素做了讨论。

2 $\Phi 600$ 干涉仪波长调谐误差与振动抑制方法

2.1 $\Phi 600$ 干涉仪中的波长调谐误差与振动

$\Phi 600$ 干涉仪采用波长调谐移相干涉术提取波面信息, 其采集的移相干涉图光强数据为

$$I_n(x, y) = I_0 \{1 + V \cos[\varphi(x, y) + \psi_n + \epsilon_n]\}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (1)$$

式中 $\begin{cases} \varphi = \frac{4\pi L}{\lambda_0} \\ \psi_n = \frac{4\pi}{\lambda_0^2} \Delta\lambda_n L \end{cases}$, I_0 为入射光强, V 为调制度, φ

为待求相位, ψ_n 为移相量, λ_0 为激光器的中心波长, $\Delta\lambda_n$ 为波长改变量, L 为干涉腔长, ϵ_n 为相移误差。理想情况下, 相移误差 $\epsilon_n = 0$, 对某一给定的干涉腔长 L , 改变波长使 $\Delta\lambda_n$ 按照人为设定值变化, 相位 ψ_n 变化满足定步长移相算法要求, 形成移相干涉。

$\Phi 600$ 干涉仪中存在因波长改变量不准确导致的移相不准, 这里称为波长调谐误差。现实情况中为了测试某些特殊工件, 需满足干涉腔长达到 5 m。在此测试条件下, 若要实现步长为 $\pi/2$ 的移相, 波长变化量比皮米量级小 2 个数量级。实际情况中受到控制电路分辨率限制, 不能保证每次移相均为 $\pi/2$ 的整数倍; 而且由于控制电路的不稳定性, 输出电压在某个预设值附近来回波动, 带来随机的波长调谐误差。因此实际移相量是一个随机值, 由 (1) 式可得瞬时待测相位 $\varphi'_n = \varphi_n$ 及瞬时移相量 $\psi'_n = \psi_n + \frac{4\pi}{\lambda_0^2} \delta_{\lambda-n} L$, 其中 $\delta_{\lambda-n}$ 是波长实际改变量与设定值之间的差值, 引入的波长调谐误差为

$$\epsilon_{w-n} = \frac{4\pi}{\lambda_0^2} \delta_{\lambda-n} L. \quad (2)$$

$\Phi 600$ 干涉仪体积较大, 需放置在隔振平台上工作。平台很大程度地隔离了地面振动, 但是来自环境的振动 (如风机) 可以通过空气传播, 会对干涉测量造成较大的影响。振动对干涉仪的影响主要表现为反射平晶相对于透射平晶的轴向移动。设采集第 n 帧干涉图时, 由于振动导致的腔长变化量为 ΔL_n , 由 (1) 式可得瞬时待测相位 $\varphi''_n = \varphi_n + \frac{4\pi}{\lambda_0} \Delta L_n$ 以及瞬时移相量 $\psi''_n = \psi_n + \frac{4\pi}{\lambda_0^2} \Delta\lambda_n \Delta L_n$, ΔL_n 为波长量级, 设定的波长改变量 $\Delta\lambda_n$ 一般小于 pm 量级, 即 $\Delta\lambda_n \ll \lambda_0$ 可知 $\frac{4\pi}{\lambda_0^2} \Delta\lambda_n \Delta L_n \rightarrow 0$, 振动引入的相移误差为

$$\epsilon_{v-n} = \frac{4\pi}{\lambda_0} \Delta L_n. \quad (3)$$

$\Phi 600$ 干涉仪中同时存在波长调谐误差与振动。

由(2)式和(3)式,第 n 帧引入的相移误差为

$$\epsilon_n = \epsilon_{v-n} + \epsilon_{w-n} = \frac{4\pi}{\lambda_0} \Delta L_n + \frac{4\pi}{\lambda_0^2} \delta_{\lambda-n} L_n. \quad (4)$$

根据(2)式和(3)式,可知波长调谐误差完全由实际波长调谐量决定,振动引入的相移误差则主要由平晶轴向移动量决定。波长改变量由于受到控制电路不稳定的影响,(2)式中 $\delta_{\lambda-n}$ 是随机值;实验室条件下存在多种频率的振动,(3)式中 ΔL_n 是多种频率振动叠加的形式。因此(4)式所表示的第 n 帧相移误差 ϵ_n 是随机值,必须提出一种可以同时抑制波长调谐误差与振动的算法。

2.2 基于 CSI 的波长调谐误差与振动联合抑制

CSI 的基本思想是将包含线性载频的移相干涉图数据按行或按列交叠排列,组成同时包含空域、时域信息的时空条纹图(STF),在 STF 图频谱中,由于线性载频的存在,代表相位信息的信号谱与代表相移误差的误差谱相互分离,利用合适的滤波窗将信号谱滤出,即可抑制相移误差重构正确相位^[21]。该方法分为两个步骤:1)排列移相干涉图构造 STF 图;2)从 STF 图的频谱中提取相位信息。

采集干涉图前首先调整干涉仪测试镜的倾斜量引入 x 方向的线性载频 f_c 。采集移相过程中的 M 幅干涉图,对所有的干涉图按列交叠重组得到

STF。

对 STF 作二维傅里叶变换得到频谱 $S(f_x, f_y)$, 频域中在移相频率 f_0 ($f_0 = 1/M$) 附近有两支靠得很近的旁瓣,它们的表达式分别为

$$S(f_0 + f_c, 0) = \frac{I_0 V}{2} (1 + R_1) \hat{\Theta}_{+1}(f_x - f_0 - f_c, f_y), \quad (5)$$

$$S(f_0 - f_c, 0) = \frac{I_0 V}{2} R_2 \hat{\Theta}_{-1}(f_x - f_0 + f_c, f_y), \quad (6)$$

式中

$$R_1 = -\frac{1}{iM} \sum_{n=0}^{M-1} \epsilon_n,$$

$$R_2 = -\frac{1}{iM} \sum_{n=0}^{M-1} \epsilon_n \exp(-i4\pi n f_0),$$

$\hat{\Theta}_{\pm 1} = \mathcal{F}[\exp(\pm i\varphi + 2\pi f_c x')] = \hat{\Theta}_{\pm 1}(f_x \mp f_c, f_y)$, 式中 x' 为扩展坐标, φ 为 φ 的扩展相位, \mathcal{F} 表示傅里叶变换。(5)、(6)式分别代表相位谱与误差谱; R_1 与 R_2 均为相移误差系数,与(4)式所表示的相移误差有关。

由于载频 f_c 的存在,相位谱与误差谱间距为 $2f_c$ 。最后用滤波器 $G(f_x, f_y)$ 将(5)式的旁瓣滤出,以恢复展宽的相位 φ ,误差系数 R_1 在相位恢复运算中将通过除法消去:

$$\hat{\varphi}(x', y) + 2\pi(f_c + f_0)x' = \arctan \frac{\text{Im}\{\mathcal{F}^{-1}[S(f_x, f_y)G(f_x, f_y)]\}}{\text{Re}\{\mathcal{F}^{-1}[S(f_x, f_y)G(f_x, f_y)]\}} = \arctan \frac{\text{Im}\{I_0 V(1 + R_1) \exp(i\varphi + i2\pi f_c + i2\pi f_0)\}}{\text{Re}\{I_0 V(1 + R_1) \exp(i\varphi + i2\pi f_c + i2\pi f_0)\}}, \quad (7)$$

式中 $\text{Im}\{\}$ 代表取虚部, $\text{Re}\{\}$ 代表取实部。利用(7)式得到展宽相位分布后,再将展宽的相位恢复到原始大小,并解包待测相位恢复原始相位。

因此 CSI 对相移误差的具体形式没有要求,因此能够用于抑制大口径干涉仪中由波长调谐误差和振动导致的复合相移误差对相位恢复的影响。

3 数值仿真

3.1 CSI 对波长调谐误差的抑制

$\Phi 600$ 干涉仪采用的激光源为 NEW FOCUS 公司研制的 Vortex TLB7000 激光器。该激光器是通过电压控制源输入电压控制压电陶瓷改变谐振腔长,实现高精度无跳模的波长调谐。激光波长改变量与电压控制源输出电压呈线性变化关系,其比例系数为 0.07 nm/V 。激光器中心波长为 632.8 nm ,

在测试腔长为 5 m 的条件下,若要实现 $\pi/2$ 精确移相,对应的电压控制源电压变化值约为 $150 \mu\text{V}$ 。电压控制源的极限分辨率为 $19 \mu\text{V}$,可知在这样的条件下不可能实现每步 $\pi/2$ 精确移相。除此以外,要想使得稳压源的输出电压控制在微伏量级是比较困难的,由于稳压源电路噪声的影响,电压输出会在 $\pm 38 \mu\text{V}$ 范围内漂移。综上两个因素,(2)式中 $\delta_{\lambda-n}$ 在 $(-\lambda/15, \lambda/15)$ 范围内随机取值。

利用 Zernike 多项式构造的标准波面如图 1(a) 所示,峰谷(PV)值为 0.0993λ ,方均根(RMS)值为 0.0208λ 。设定背景光强与可见度按照高斯函数形式分布,图像边缘幅度大约等于中心的 $1/2$,在原始干涉图中加入载频 f_c ,并且 $\delta_{\lambda-n}$ 在 $-\lambda/15 \sim \lambda/15$ 范围内随机取值,仿真得到干涉图,其中 1 帧如图 1(b) 所示。

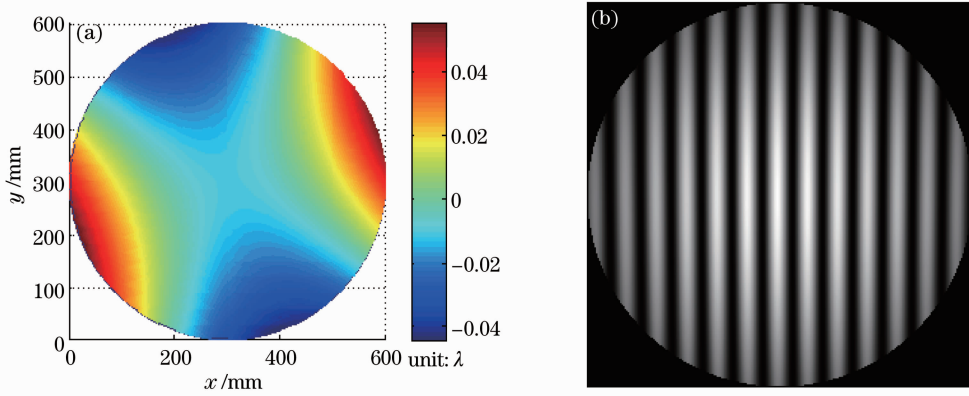


图 1 标准波面与仿真干涉图。(a)标准波面；(b)其中 1 帧仿真干涉图

Fig. 1 Standard wavefront and simulated interferogram. (a) Standard wavefront profile; (b) a frame of simulated interferogram

将幅移相干涉图按列交叠排列得到 STF 图,如图 2(a)所示。对 STF 图做傅里叶变换得到它的频谱,如图 2(b)所示。从图 2(c)可知由于载频 f_c 的存在,使得信号谱与误差谱相互分离。

使用 PSI 计算相位的结果如图 3(a)所示,峰谷(PV)值为 0.154λ ,RMS 值为 0.0287λ ,相位分布有明显的“波纹”现象,该波纹是由于相移误差导致的相位测量误差,其空间频率为原始干涉图载频的 2 倍。计算得到的误差均方根(ERMS)为 0.0199λ 。

使用 CSI 算法得到的结果如图 3(b)所示,PV 值为 0.116λ ,RMS 值为 0.0207λ ,ERMS 值为 $1 \times 10^{-3}\lambda$ 。

连续仿真 20 次并利用 CSI 以及 PSI 算法解算相位,结果如图 3(c)所示。结果显示,使用 PSI 算法求解相位,ERMS 均值为 0.0146λ ,而使用 CSI 求解相位误差 ERMS 均值为 0.0012λ ,其精度是 PSI 的 12 倍。因此存在波长调谐误差时,使用 CSI 求解相位的效果要明显好于 PSI。

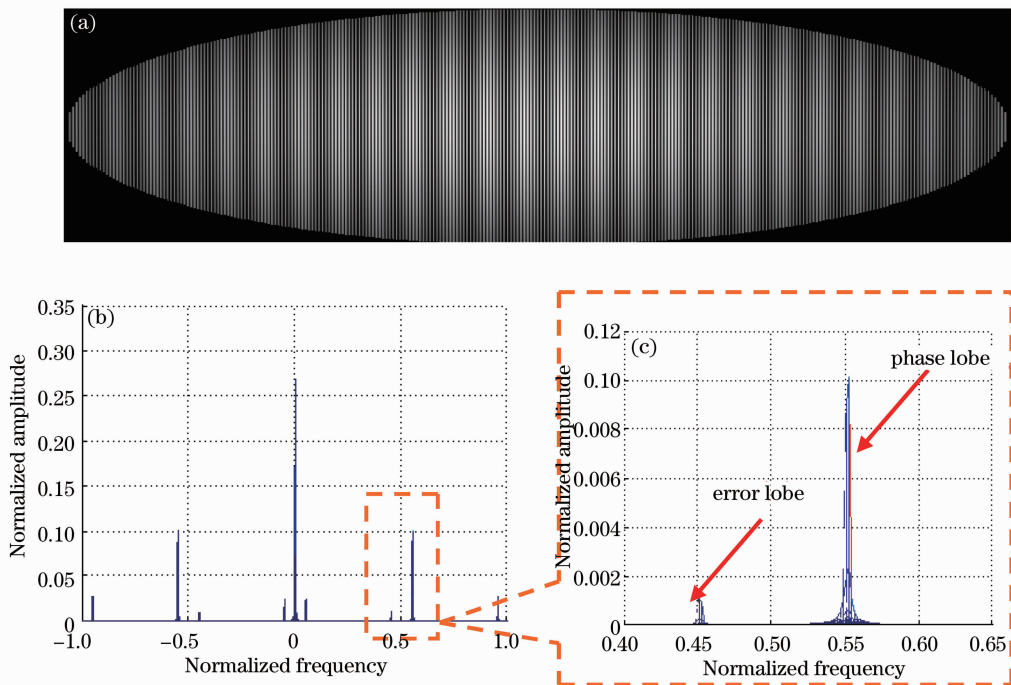


图 2 STF 及其频谱。(a)由仿真干涉图重构得到的 STF；(b) STF 频谱；(c) STF 频谱局部放大

Fig. 2 STF and spectrum of STF. (a) STF by reconstructed simulated interferograms; (b) STF spectrum; (c) drawing of partial enlargement

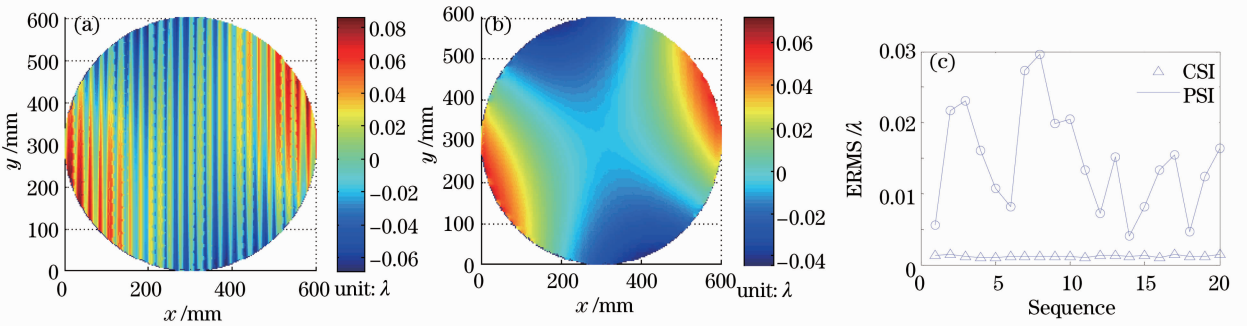
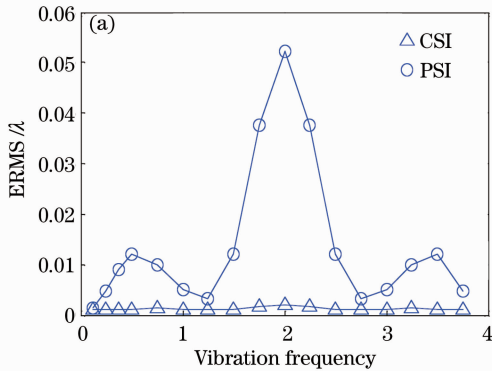


图3 存在波长调谐误差时 PSI 与 CSI 解算相位对比。(a) PSI 求得波面分布；(b) CSI 求得波面分布；(c) 由仿真干涉图解算得到的 ERMS

Fig. 3 Contrast of phase retrieved by PSI and CSI in presence of inaccurate wavelength increment. (a) Retrieved wavefront profile by PSI; (b) retrieved wavefront profile by CSI; (c) demodulated ERMS values of simulated interferograms

3.2 CSI 对振动的抑制

Ruiz 等^[22]测量了实验室条件下光学平台所受来自地板的振动,认为环境振动能量主要集中在 100 Hz 以下的频率成分中。Groot^[23]分析了振动存在时对测量结果造成的影响,认为振动引起的测量误差峰值出现在振动频率等于移相频率 2 倍处。因此讨论振动频率与移相频率相当时,CSI 对不同频率振动的抑制效果,并讨论振动频率是移相频率 2 倍时,CSI 对不同振幅振动的抑制效果。



如果 $\Phi 600$ 干涉仪测试过程中存在振动,(3)式中 ΔL_n 按照一个余弦函数形式变化:

$$\Delta L_n = A \cos(2\pi\nu_v t_n + \alpha), \quad (8)$$

式中 t_n 表示第 n 个采样时刻, α 为振动的初始相位。设定(8)式中振动幅度 A 为 $\lambda/15$, ν_v 振动频率表示为移相干涉图采样频率的倍数。此时针对不同频率振动的仿真结果如图 4(a) 所示;再设定振动频率 ν_v 为移相干涉图采样频率的 2 倍,针对不同振幅振动的仿真结果如图 4(b) 所示。

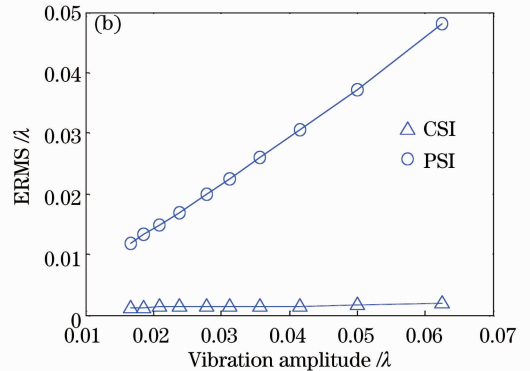


图4 存在振动时 PSI 与 CSI 解算相位对比。(a)不同振动频率;(b)不同振动振幅

Fig. 4 Contrast of phase retrieved by PSI and CSI in presence of vibration with (a) different vibration frequencies and (b) vibration amplitudes

结果显示,存在不同频率振动时,PSI 解算出的相位精度范围在 $\lambda/1000 \sim \lambda/25$,起伏较大,然而 CSI 解算精度能够稳定在 $\lambda/500 \sim \lambda/1000$;存在不同振幅振动时,CSI 算法的相位求解精度要高于 PSI 算法 10 倍以上。因此,在振动存在的条件下,使用 CSI 求解相位的效果也明显好于 PSI。

综上所述,当 600 干涉仪中存在波长调谐误差以及振动时,CSI 算法从相位解算的精度要明显好于 PSI 算法。

4 实验装置及实验结果

南京理工大学承担了 $\Phi 600$ 干涉仪研制任务,该干涉系统的实物如图 5 所示。该系统以菲佐型干涉仪为基本形式。实验室条件下测试腔长为 $L = 1$ m,测试有效口径 600 mm。为仿真振动对干涉仪造成的影响,关闭抗振平台的气阀,使地面振动可以传递到干涉系统中。

对 $\Phi 600$ 平面干涉仪进行空腔测试,采集到的其中 1 帧移相干涉图如图 6(a) 所示。利用 PSI 求

解相位得到的相位分布如图 6(b)所示,求得波面分布的 PV 值为 0.148λ ,RMS 值为 0.0223λ ,波面分布包含明显的波纹。利用 CSI 算法解算的波面分布如图 7(a)所示,该波面分布中由于相移误差导致的波纹现象消失,它的 PV 值为 0.0822λ ,ERMS 值为 0.0155λ 。

为了得到更加接近于真实的相位分布,将气浮阀门打开隔绝地表振动,测试腔长改为 200 mm 排除波长调谐误差的影响,并在外部环境相对安静的夜间进行空腔测试。利用 PSI 求得一个标准波面分布如图 7(b)所示,其 PV 值为 0.107λ ,RMS 值为 0.0152λ 。



图 5 Φ600 平面干涉仪实物图

Fig. 5 A photo of Φ600 Fizeau interferometer

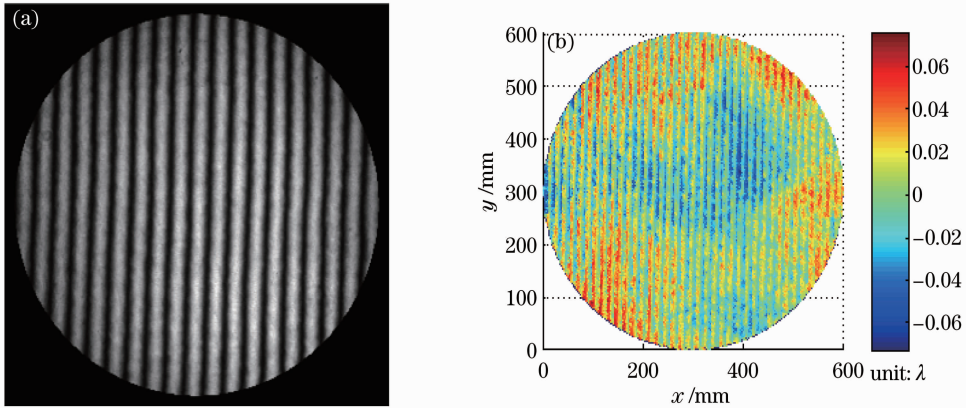


图 6 Φ600 干涉仪移相干涉图及 PSI 解算相位分布。(a)采集到的其中 1 帧干涉图;(b) PSI 算法求得波面分布
Fig. 6 Phase-shifting interferogram capture by CCD and retrieved phase profile by PSI. (a) A frame of captured interferogram; (b) retrieved wavefront profile by PSI

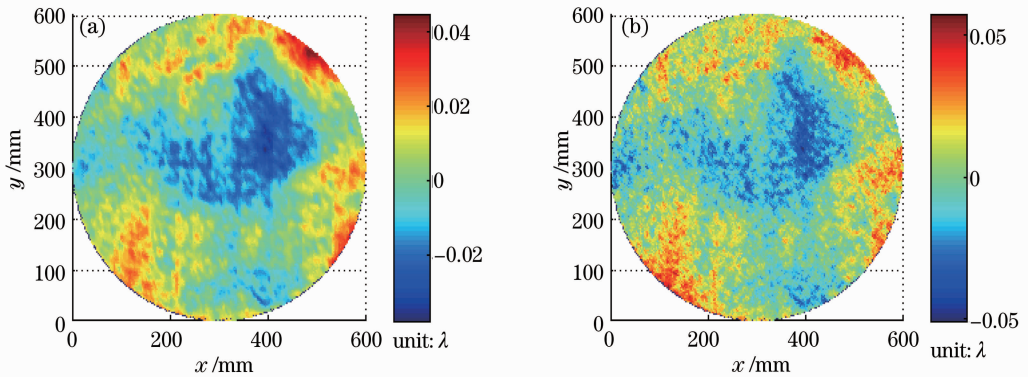


图 7 CSI 解得波面分布与标准波面分布。(a) CSI 解得波面分布;(b)标准波面分布

Fig. 7 Retrieved wavefront profile by CSI and standard wavefront profile. (a) Retrieved wavefront profile by CSI; (b) standard wavefront profile

将标准波面与 PSI 所求波面相减得到的测量误差波面分布,如图 8(a)所示,ERMS 值为 0.0165λ 。将标准波面与 CSI 所求波面相减也得到对应的测量误差波面分布,如图 8(b)所示,ERMS 值为

0.0066λ 。由此可知,当存在波长调谐误差以及振动的情况下,CSI 算法显示了优于传统 PSI 算法的性能,其精度是传统 PSI 算法的 2.5 倍。

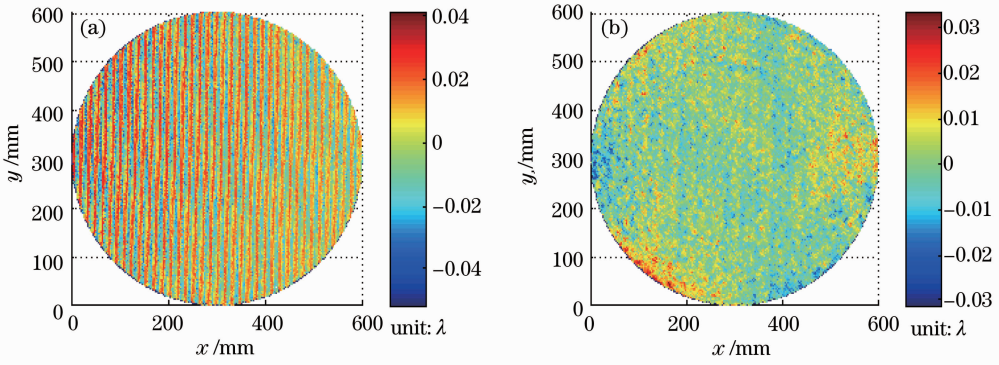


图 8 两种算法的测量误差。(a) PSI 测量误差；(b) CSI 测量误差

Fig. 8 Demodulated error by the two algorithms. (a) Demodulated error by PSI; (b) demodulated error by CSI

5 讨 论

5.1 移相干涉图载频的取值

STF 频谱显示, (5) 式所代表的相位谱与 (6) 式所代表的误差谱都在载频 f_0 附近, 它们之间的间隔为移相干涉图载频 f_c 的 2 倍。为了使恢复的相位不受相移误差的影响, 要求载频 f_c 大小能使得相位谱与误差谱之间不发生混叠。CSI 实际求解的是有原始相位 φ 在 x 方向扩展的扩展相位 $\hat{\varphi}$ 。扩展相位 $\hat{\varphi}$ 与原始相位的关系可以表示为

$$\hat{\varphi}(x, y) \approx \varphi\left(\frac{x}{M}, y\right). \quad (9)$$

根据二维傅里叶变换的尺度变换性质, 可以得到扩展相位频谱 $\hat{\Theta}$ 与原始相位 Θ 的频谱的关系

$$\hat{\Theta} = M\Theta(Mf_x, f_y), \quad (10)$$

即相位谱沿 f_x 轴收缩, 它的半峰全宽为原来的 $1/M$ 倍。若认为误差谱的半峰全宽与信号谱相同, 并且采集 4 幅移相量为 $\pi/2$ 的移相干涉图, 设定原始相位频谱 f_x 方向的半峰全宽为 H , 理想情况下单幅移相干涉图载频 f_c 只需满足 $f_c > H/4$ 。

由于 STF 图载频 f_0 远大于背景光强频谱的半宽度, 因此不需要考虑背景光强频谱。然而, 若使用单幅载频干涉图的傅里叶变换解调法 (FT 法), 不仅需要 ± 1 级谱分离, 而且当背景光强不均匀时, 必须使得背景光强谱与相位谱分离, 理想情况下载频应满足 $f'_c > H + H_0$, 式中 H_0 是背景光强频谱的半宽度。

综上所述, 采用 CSI 算法求解相位的载频要求要低于 FT 法, 这是 CSI 算法的优势所在。

5.2 频域滤波器的选取

由于 $\Phi 600$ 平晶面形信息中还包含了高频信息, 仅仅满足 $f_c > H/4$ 并不能精确恢复相位。本文中采用的滤波器为高斯带通滤波器, 它的表达式为 $G(f_x, f_y) = \exp\{-[(f_x - \mu_0)/\sigma_x^2 + (f_y - \nu_0)/\sigma_y^2]\}$, 式中 (μ_0, ν_0) 为滤波窗频率中心, σ_x, σ_y 分别表征该滤波器 f_x, f_y 方向上的宽度。不难看出滤波窗中心频率取值为 $\mu_0 = f_0 + f_c, \nu_0 = 0$ 。根据 (10) 式, 可知相位谱收缩为原来的 $1/M$ 倍, 为了保证滤波器与相位谱的各向同性需满足 $\sigma_x = \frac{\sigma_y}{M}$ 。选择滤波窗时, 应

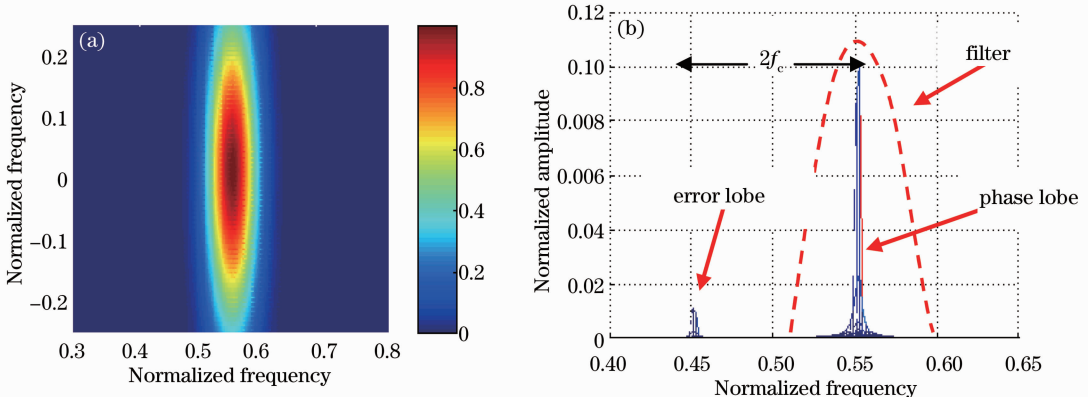


图 9 高斯型带通滤波器以及滤波示意图

Fig. 9 Gaussian band-pass filter and sketch map of filter filtering process

使其既能保留波面中的高频信息又可以抑制相移误差。若认为 $4\sigma_x$ 是高斯滤波器的截止频率,其参数应该满足 $H < \sigma_x < \frac{f_c}{4}$ 。此时的高斯滤波器示意图,以及该滤波器与相位谱、误差谱以及载频 f_c 的关系如图 9 所示。

综上所述,为了能够精确恢复相位,载频 f_c 应为相位谱半峰全宽的 4 倍以上,滤波器的 f_x 方向上的宽度 σ_x 要在相位谱半峰全宽 H 与 $f_c/4$ 之间。

6 结 论

在振动以及波长调谐误差都存在的条件下,CSI 相比较传统移相算法,有更高的相位恢复精度。数值仿真的结果说明,针对干涉仪中存在的波长调谐分辨率受限,振动等问题,CSI 精度是传统移相算法的 10 倍以上,即对波长调谐误差与振动的抑制性能要远好于传统移相算法。实验结果说明在 $\Phi 600$ 干涉仪中采用 CSI 算法的相位恢复精度是传统移相算法的 2.5 倍,即可以有效抑制振动与波长调谐误差带来的测量误差。

由于不用考虑背景分量频谱的半峰全宽,相对于 FT 算法,CSI 载频要求较低。为了能够精确恢复相位,应使得单幅干涉图载频为相位谱半峰全宽的 4 倍以上。该技术只需要 4 帧干涉图就可以高精度恢复相位,计算快速简便。

参 考 文 献

- 1 L. L. Deck, J. A. Soobitsky. Phase-shifting via wavelength tuning in very large aperture interferometers[C]. *SPIE*, 1999, **3782**: 432~442
- 2 C. Ai, B. Knowiden, J. Lamb. Design of a 24" phaseshifting Fizeau interferometer [C]. *SPIE*, 1997, **3134**: 565~572
- 3 R. Zhu, L. Chen, Z. Gao *et al.*. Near infrared large aperture (24 inches) interferometer system development[C]. The Sixth International Workshop on Advanced Optical Metrology, 2009. 705~708
- 4 J. Schwider, R. Burow, K. E. Elssner *et al.*. Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(21): 3421~3432
- 5 P. J. Groot, L. L. Deck. Numerical simulations of vibration in phase-shifting interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(13): 2172~2178
- 6 J. Schmit, K. Creath. Extended averaging technique for derivation of error-compensating algorithms in phase-shifting

- interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(19): 3610~3619
- 7 Zhu Rihong, Chen Jinbang, Wang Qing *et al.*. A new algorithm on phase shifting interferometry: the overlapping averaging 4-frame algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(12): 1288~1293
朱日宏,陈进榜,王青等.移相干涉术的一种新算法:重叠四步平均法[J]. *光学学报*, 1994, **14**(12): 1288~1293
- 8 K. Okada. Simultaneous calculation of phase distribution and scanning phase-shift in phase-shifting interferometry [J]. *Opt. Commun.*, 1991, **84**(3-4): 18~24
- 9 Z. Y. Wang, B. T. Han. Advanced iterative algorithm for phase extraction of randomly phase-shifted interferograms [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(14): 1671~1673
- 10 Guo Renhui, Li Jianxin, Zhu Rihong *et al.*. Research on the randomly phase shifting algorithm with wavelength tuning[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(5): 0508002
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): 0508002
- 11 C. Zhao, J. H. Burge. Vibration-compensated interferometer for surface metrology [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(34): 6215~6222
- 12 H. Kihm, S. W. Kim. Fiber-diffraction interferometer for vibration desensitization [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(16): 2059~2061
- 13 P. de Groot. Derivation of algorithms for phase-shifting interferometry using the concept of a data-sampling window [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(22): 4723~4730
- 14 J. M. Huntley. Suppression of phase errors from vibration in phase-shifting interferometry [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(8): 2233~2241
- 15 L. L. Deck. Suppressing phase errors from vibration in phase-shifting interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(20): 3948~3960
- 16 Q. Hao, Q. Zhu. Random phase-shifting interferometry without accurately controlling or calibrating the phase shifts [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(8): 1288~1290
- 17 J. Park, S. W. Kim. Vibration-desensitized interferometer by continuous phase shifting with high-speed fringe capturing [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(1): 19~21
- 18 Wang Ming, Hao Qun, Zhu Qiudong *et al.*. Anti-disturbance phase-shifting interferometry method time-and-frequency-domain [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1112005
王明,郝群,朱秋东等.时频域双重分析法抗干扰移相干涉术[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1112005
- 19 J. Vargas, J. A. Quiroga, A. A. Herrero *et al.*. Phase-shifting interferometry based on induced vibrations [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(2): 584~596
- 20 H. Broistedt, N. R. Doloca. Random-phase-shift Fizeau interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(36): 6564~6575
- 21 Li Bo, Chen Lei *et al.*. Carrier squeezing interferometry: suppressing phase errors from the inaccurate phase shift [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(6): 996~998
- 22 P. D. Ruiz, J. M. Huntley, Y. Shen *et al.*. Vibration-induced phase errors in high-shifting interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(13): 2172~2178
- 23 P. J. Groot. Vibration in phase-shifting interferometry [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1995, **12**(2): 354~365

栏目编辑:何卓铭