

## 全视场外差移相双波长干涉面形检测技术

樊国翔<sup>1,2,3</sup>, 李 杨<sup>1,2,3\*</sup>, 张文喜<sup>1,2,3</sup>, 伍 洲<sup>1,2,3</sup>, 吕 彤<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;
2. 中国科学院计算光学成像技术重点实验室, 北京 100094;
3. 中国科学院大学 光电学院, 北京 100094)

**摘 要:** 双波长干涉检测技术可以实现高动态范围与高测试精度的兼顾, 是一种极具潜力的检测技术, 用于干涉检测的压电位移机械移相技术存在着一些问题, 使用全视场外差移相技术, 低频差的外差光源与面阵探测器采集帧率相配合, 相较于传统的压电位移机械移相技术, 可以同时保证不同波长的移相精度, 简化移相的复杂度, 且可以方便实现多步移相。提出了全视场外差移相双波长干涉测量技术, 并搭建了全视场外差移相双波长干涉测量系统, 测试了在边缘最高偏离顶点球  $13\ \mu\text{m}$  的非球面以及高度为  $(1.3\pm 0.1)\ \mu\text{m}$  的台阶, 经过实验验证其非球面面形 PV 测试精度为  $\lambda/3.53$  ( $\lambda=633\ \text{nm}$ ), 面形 PV 测试重复精度为  $\lambda/77.38$ , 面形 RMS 测试精度为  $\lambda/14.16$ , 面形 RMS 测试重复精度为  $\lambda/919.10$ , 台阶高度测试精度为  $\lambda/16.19$ , 测试重复精度为  $\lambda/311.85$ 。

**关键词:** 面形检测技术; 全视场外差; 双波长干涉; 非球面; 移相

**中图分类号:** TH741 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220118

## Full-field heterodyne phase shifting two-wavelength interferometry surface testing technologies

Fan Guoxiang<sup>1,2,3</sup>, Li Yang<sup>1,2,3\*</sup>, Zhang Wenxi<sup>1,2,3</sup>, Wu Zhou<sup>1,2,3</sup>, Lv Tong<sup>1,2</sup>

1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
2. Key Laboratory of Computational Optical Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
3. School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Because of its high dynamic range and high accuracy, two-wavelength interferometry has great potential, but there are some problems with the use of piezoelectric phase shifting technology, compared with the conventional piezoelectric phase shifting technology, in full-field heterodyne phase shifting technology, the heterodyne light source with low frequency difference can easily realize multi-step phase shifting algorithm, simplify the procedure of phase shifting, ensure the phase shifting accuracy of different wavelengths at the same time. A full-field heterodyne two wavelength phase shifting interferometry is proposed and a full-field heterodyne two wavelength phase shifting interferometer system is built, an aspheric mirror with maximum deviation of  $13\ \mu\text{m}$  at the edge and a step with a height of  $(1.3\pm 0.1)\ \mu\text{m}$  is tested. With some experiment tests, the PV error is  $\lambda/3.53$  at  $633\ \text{nm}$  wavelength, the PV repeatability is  $\lambda/77.38$ , the RMS error is  $\lambda/14.16$ , the RMS repeatability is  $\lambda/919.10$  when testing the aspheric mirror and the height error is  $\lambda/16.19$ , the height repeatability is  $\lambda/311.85$  when testing the step.

收稿日期: 2022-02-22; 修订日期: 2022-03-30

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDC07040300)

作者简介: 樊国翔, 男, 硕士生, 主要从事光学面形精密检测方面的研究。

通讯作者: 李杨, 男, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事光学精密检测技术方面的研究及光学相干测量仪器的研制工作。

**Key words:** surface testing technology; full-field heterodyne; two wavelength interferometry; asphere; phase shifting

## 0 引言

随着航空航天、军工、半导体等产业的飞速发展,光学系统中使用的非球面或自由曲面元件越来越多,其面形精度要求也越来越高,这对精密制造工艺提出了更高的要求,同时也对精密检测技术产生了不小的挑战。在非球面面形检测中,通常希望面形可以高精度一次性快速检出,但高精度的检测方法如白光干涉仪<sup>[1]</sup>等通常检测速度较慢,各种接触式检测方法如三坐标测量仪<sup>[2]</sup>、轮廓仪等甚至有划伤表面的风险<sup>[3]</sup>,检测动态范围较大的方法如条纹投影法<sup>[4]</sup>通常精度较低,无法胜任精密面形检测工作。双波长干涉测量技术可以实现高精度和大测量动态范围的兼顾<sup>[5]</sup>,相较于单波长干涉仪的高精度、低动态范围,双波长干涉仪相当于将两个单波长拓展为一个合成波长进行测试,合成波长通常远大于任一单波长,干涉测量的动态范围可以进一步得到扩展。

1984年, Yeou-Yen Cheng 等人提出了双波长移相干涉术<sup>[6]</sup>,利用等效波长来扩展单波长移相干涉技术的动态范围,缓解了传统单波长可见光干涉仪测量较大偏差面形时产生的 $2\pi$ 跳变过多问题;1991年, Yukihiro Ishii<sup>[7]</sup> 等人在波长调谐双波长干涉仪的基础上,运用双波长同时移相思路处理双波长莫尔条纹干涉图,直接求解合成波长的相位;1996年,悉尼大学的 Hariharan 研究组设计了基于偏振移相的双波长移相干涉仪<sup>[8]</sup>,通过旋转半波片的方式进行移相,透过检偏器的相同偏振方向的光发生干涉形成干涉条纹,该干涉条纹被 CCD 接收进行后续处理;2004年,美国 4D Technology 公司研制了 4D PhaseCam 4000-MW 型多波长动态干涉仪<sup>[9]</sup>,通过消色差设计,可以实现干涉图的同时采集和动态测量;2009年, Hsieh H C 等<sup>[10]</sup>将电光调制型全视场外差方法引入双波长移相干涉法中。南京理工大学课题组在 2004~2018 年间以压电位移机械移相为移相手段,对分时移相双波长法<sup>[11-13]</sup>和同时移相双波长法<sup>[14]</sup>进行了深入研究。

文中提出了一种全视场外差移相双波长干涉测量技术,移相方式由移相系统中常用的压电位移机械移相转变为声光调制的全视场外差移相<sup>[15-18]</sup>,带来几

个优势:(1)系统没有运动器件,避免了压电位移移相器件存在的非线性<sup>[19]</sup>、迟滞、蠕变等机械误差影响;(2)可以同时实现两种波长的精确移相,免除压电位移移相器件需要针对两种波长分别校准与推动的过程;(3)移相步数越多,干涉测量的精度与抗干扰能力就越强<sup>[5,20]</sup>,全视场外差移相通过面阵探测器帧率与光源外差频率的合理设计,容易实现更多步的移相,因此能够更方便快捷且高精度地实现非球面面形的测量过程。

## 1 基本原理

### 1.1 全视场外差移相双波长干涉测量技术

文中基于泰曼-格林型干涉仪来实现全视场外差移相双波长干涉测量系统,如图 1 所示,该系统可以分为双波长外差光源和干涉测量部分。

系统以光线前进方向为  $z$  轴,垂直于光传播平面向上为  $y$  轴, $x$  轴与  $y$  轴、 $z$  轴符合右手坐标系分布。双波长外差光源包括两个波长的双频正交外差光源,两光源结构相似,以  $\lambda_1$  波长光源为例进行说明。激光器 1(Laser1)发出的光由偏振分光棱镜 1(PBS1)分为两束偏振方向相互垂直的线偏振光,分别通过两个声光调制器(AOM1 和 AOM2)进行光频率调制以产生相干外差,两声光调制器输出光的+1级(或-1级)有一个固定差频 $\Delta f$ ,由两个反射镜(M1 和 M2)分别转折光路,到偏振分光棱镜 2(PBS2)合束,最终形成具有一定差频、偏振方向相互垂直的光。两波长输出光分别经过空间滤波器,过滤杂散光,提高波前质量。分别准直之后经过宽带分光棱镜(BS1)合束,各有一部分能量进入到干涉测量系统中参与测量,光阑(Stop)用于限制进入干涉测量部分的光束口径,光开关(Shutter)用于两波长光独立测试时遮挡另一束光。

将干涉测量部分(Interferometer)参考镜(Reference mirror)所在的一路记作参考路,待测镜(Test mirror)所在的一路记作待测路,面阵探测器(Detector)所在的一路记作成像路。双波长外差光源中的光进入后两垂直偏振方向的光被宽带偏振分光棱镜 5(PBS5)分开,每个偏振方向各携带一个光频率的光分别进入参考路和测量路,其中  $1/4$  波片(QWP1、QWP2)与系

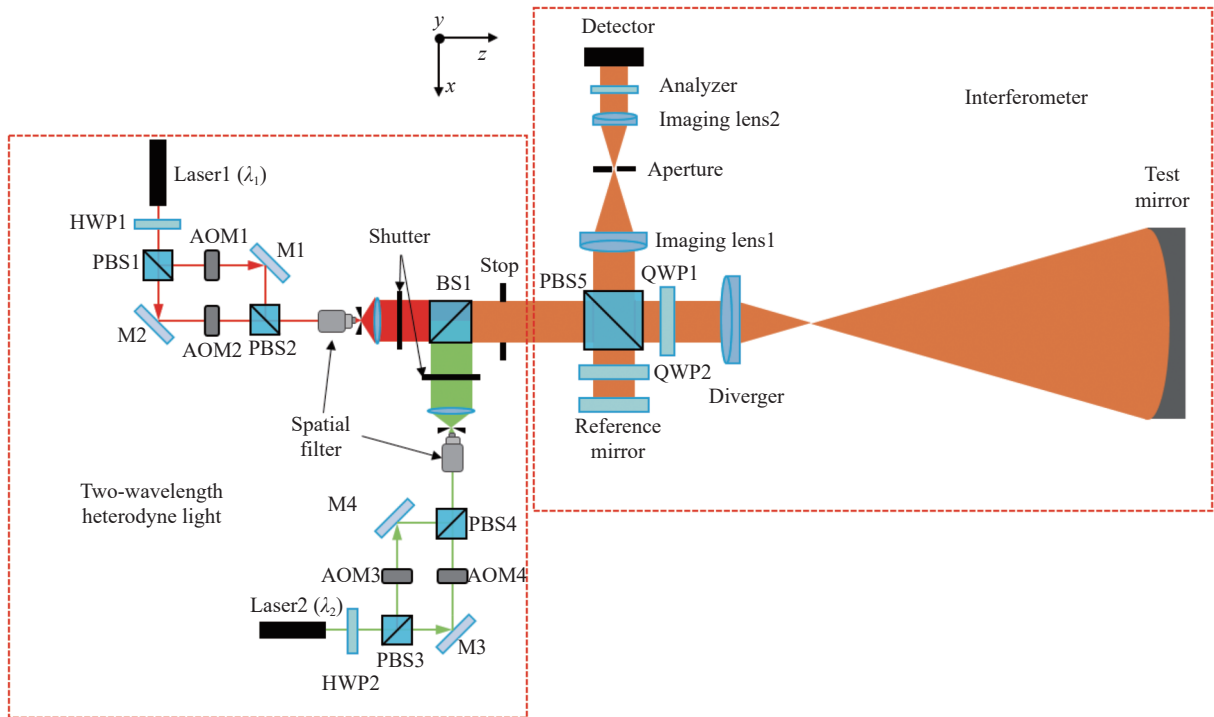


图 1 全视场外差移相双波长干涉测量系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of full-field heterodyne phase shifting two-wavelength interferometer system

统  $x$  轴成  $45^\circ$  放置, 光进入和被镜面反射两次通过  $1/4$  波片, 偏振方向旋转  $90^\circ$ , 原来被 PBS5 反射的光会透过 PBS5, 同样原来被 PBS5 透射的光会被 PBS5 反射, 两路光均进入成像路, 且两路光偏振方向仍然相互垂直。待测路使用标准球面波发生镜 (Diverger) 将平面波转变为标准球面波, 当该球面波的曲率半径与待测非球面镜的曲率半径相互匹配时, 非球面与该波前的差别最小, 可以有效减少干涉图的条纹数。成像镜 1、成像镜 2 以及小孔 (Aperture) 用于变换光束口径, 便于面阵探测器接收干涉图, 同时配合标准球面波发生镜还可以对待测镜共轭成像<sup>[21]</sup>, 偏振片 (Analyzer) 与系统  $x$  轴成  $45^\circ$  放置, 两偏振方向相互垂直的光通过后, 与偏振片透振方向相同的偏振分量通过, 此时两光束偏振方向相同发生干涉, 干涉图被面阵探测器接收进行后续处理。

全视场外差移相方法配合干涉仪可以得到两单波长的包裹相位, 双波长法则通过两单波长的包裹相位数据得到合成波长的包裹相位, 两者配合后续的解包裹算法即可得到待测面的面形结果。

### 1.2 全视场外差移相双波长干涉测量面形解算方法

相较于单点外差干涉而言, 全视场外差移相利用

面阵探测器同步记录二维外差干涉信号, 干涉图上每个点通过拍频产生周期性的相位变化来实现移相<sup>[22]</sup>。通常情况下, 干涉仪形成的干涉图用公式 (1) 表示<sup>[23]</sup>:

$$I(x, y) = I_0(x, y) + \gamma(x, y) \cos(2\pi\Delta f t + \Delta\phi(x, y))$$

$$I(x, y) = I_0(x, y) + \gamma(x, y) \cos\left(2\pi\Delta f t + \frac{2\pi n}{\lambda} \Delta L(x, y)\right) \quad (1)$$

式中:  $I_0(x, y)$  表示背景光强;  $\gamma(x, y)$  表示调制强度;  $\Delta f$  表示参与干涉的两束光的外差频率,  $\Delta f$  为 0 时为稳定干涉的零差干涉, 而  $\Delta f$  不为 0 时则是外差干涉;  $\Delta\phi(x, y) = \frac{2\pi n}{\lambda} \Delta L(x, y)$  为待解算出的相位, 其中  $\Delta L(x, y)$  为干涉的两束光之间的光程差。

移相方法能最大程度地减少背景光强不均匀带来的误差, 因此面形检测中一般使用移相方法对干涉图进行处理, 得到待测物体的包裹相位图。压电位移机械移相方式需要复杂的机械结构来保证移相精度, 波长移相则需要对光源进行比较复杂的调制<sup>[24]</sup>, 最终的调制结果受仪器所处的环境影响较大。文中采用全视场外差的方式来实现移相, 通过控制参与干涉的两束光的光频率之间产生赫兹级的差频  $\Delta f$ , 使得干涉图的相位变化与时间相关, 假设  $\Delta f$  已知, 则公式 (1) 中干涉图整体的相位随着时间  $t$  在  $0 \sim 2\pi$  之间周

期性变化, 对应于干涉图中每一点相位都在周期性变化。

假设面阵探测器采样的初始时间  $t=0$ , 移相步数为  $n$ , 则相应的面阵探测器采样频率为  $n\Delta f$ , 以四步移相为例, 一周期内采样的干涉图可以用公式 (2) 表示:

$$I(x, y, i) = I_0(x, y) + \gamma \cos\left(\Delta\phi(x, y) + 2\pi \frac{i-1}{n}\right), i = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

假设  $n$  为 4, 则待测面的包裹相位可以通过公式 (3) 求得:

$$\Delta\phi(x, y) = \arctan\left(\frac{I(x, y, 4) - I(x, y, 2)}{I(x, y, 1) - I(x, y, 3)}\right) \quad (3)$$

通过两次独立测试可分别测得两单波长的包裹相位数据。全视场外差移相方法针对外差频率的滤波特性, 减小了周围环境相关的变量对移相的影响, 使得干涉测量过程对于仪器所处环境如振动、气流等影响因素没有较为严格的限制<sup>[17]</sup>, 可以通过平衡外差频率与面阵探测器采样帧频来实现高效探测。

双波长法<sup>[5-14]</sup>通过处理两个单波长的包裹相位等效为合成波长的相位, 假设波长  $\lambda_a$ 、 $\lambda_b$  分别测得的两组包裹相位数据为  $\phi_{1a}, \phi_{2a}, \phi_{3a}, \dots, \phi_{Na}$  和  $\phi_{1b}, \phi_{2b}, \phi_{3b}, \dots, \phi_{Nb}$ , 其中  $N$  为面阵探测器总像元数, 对于其中对应位置任意一对相位数据:

$$\phi_{neq} = \frac{2\pi OPD_n}{\lambda_{eq}} = \phi_{na} - \phi_{nb}, \lambda_a < \lambda_b \quad (4)$$

式中:  $\phi_{neq}$  表示合成波长的包裹相位;  $\lambda_{eq}$  表示合成波长, 其表达式为:

$$\lambda_{eq} = \frac{\lambda_a \lambda_b}{\lambda_b - \lambda_a}$$

相位解包裹后由双波长法处理得到的相位图转化为面形图, 即可得到在合成波长下待测镜的面形, 如公式 (5):

$$h(x, y) = \phi_{neq}(x, y) \times \frac{\lambda_{eq}}{4\pi} = \frac{\phi_{neq}(x, y)}{4\pi} \times \frac{\lambda_a \lambda_b}{\lambda_b - \lambda_a} \quad (5)$$

## 2 实验验证与分析

### 2.1 实验系统及处理方法

图 2 为全视场外差移相双波长干涉测量系统实物图, 加入的反射镜 M5 和 M6 是为了进一步调整绿光使其与红光能更好地重合。实验中使用的两个激

光器分别为波长 633 nm 和波长 532 nm 的窄线宽激光器, 对应的合成波长为 3.3342  $\mu\text{m}$ , 光源系统中 AOM 控制两个外差光源的差频均为 5 Hz, 两光束滤波、准直之后, 被宽带分光棱镜合束至同一方向, 由光阑限制其口径为 9 mm, 为减弱光阑造成的光斑衍射, 此处采用软边光阑。不同频率的光束因偏振方向不同被干涉测量部分中的宽带 PBS5 分为两束, 分别进入参考路和测量路, 两路光携带各自路反射镜的面形信息之后进入探测路, 被成像系统转化为口径 4.5 mm 的光束, 经过偏振片之后产生干涉, 通过 CMOS 相机采集产生干涉图。

实验中采用四步移相提取干涉图的相位数据。两外差光源差频均为 5 Hz, CMOS 相机以 20 Hz 的频率进行采样, 外差光源频率与 CMOS 相机采样频率要求足够准确, 否则会引入一定的移相误差。条纹扫动的一个周期内采集四幅图像, 之后由四步移相算法得到每个单波长包裹相位数据, 两单波长包裹相位数据相减得到合成波长的包裹相位数据。合成波长包裹相位数据经过解包裹步骤后, 得到合成波长面形图。

实验过程中对待测面进行十次独立重复实验, 用十次独立重复实验测试值的平均值代表测试值, 同时利用公式 (6) 对十个测试数据处理得到系统的测试重复精度。

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

式中:  $s$  表示测试重复精度;  $n$  表示测试次数;  $x_i$  表示第

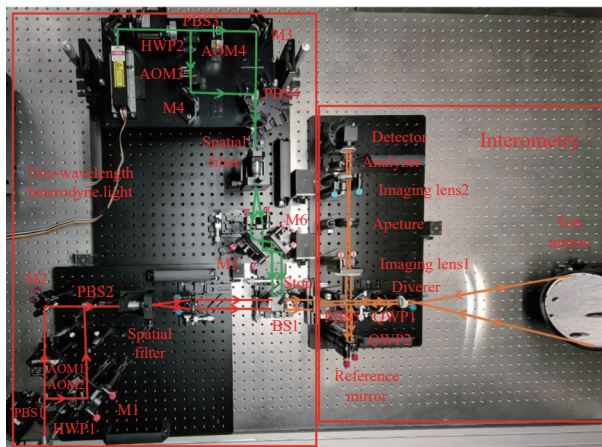


图 2 全视场外差移相双波长干涉测量系统实物图

Fig.2 Physical figure of full-field heterodyne phase shifting two wavelength interferometer system

$i$ 次测试的测试值;  $\bar{x}$ 表示 $n$ 次测试的平均值。

全视场外差移相得到两单波长包裹相位需要光源的外差频率、移相步数、面阵探测器采样帧率相匹配,而双波长法要求两单波长在面阵探测器上对应点产生的光程差也保持一致,这要求两束光首先要完全重合,其次系统中所有会引起两单色光不一致的元件都必须进行消色差处理。该系统中干涉测量部分的所有透镜都进行了消色差处理,以尽可能地保证双波长法中两单色光光程差相等的条件,但由于宽带PBS5只能保证两单色光透过率基本相同而无法完全消色差,该处会引入一定的平移和倾斜误差,这些误差会在合成波长的相位中引入额外的平移和倾斜项<sup>[25]</sup>,因此后续面形结果通过泽尼克拟合去除平移和倾斜项后显示。

## 2.2 非球面测试实验

实验中使用的待测非球面为椭球面,设计非球面顶点曲率半径为 600 mm,有效口径为 150 mm,非球面偏离顶点球最大高度为 13  $\mu\text{m}$ 。待测非球面如图 3 所示。

使用全视场外差移相双波长干涉测量系统进行该非球面的测量,标准球面波发生镜为焦距 30 mm 的消色差透镜,其  $F$  数为 3.34,小于非球面镜的  $R$  数为 4,可以实现对待测非球面镜的全口径测量。实验中

测得两单波长移相干涉图如图 4 所示。

由图 4 可以看出,单波长得到的干涉图条纹已经比较密集,通过移相算法得到的包裹相位分布同样非常密,使相位解包裹极容易因空间分辨率不足、噪声等问题产生错误<sup>[26]</sup>,如图 5(a)、(b)所示,合成波长包裹相位如图 5(c)所示,可以看出,相较于单波长包裹相位,相位包裹数大大减小。

非球面合成波长相位数据解包裹后,通过泽尼克拟合去掉平移、倾斜、离焦项得到非球面的面形结果。用标准球面对整个系统进行校准,将标准球面放在待测路,得到的干涉图的处理流程与上述非球面数据一致,在非球面面形结果中去掉标准球面测得的面

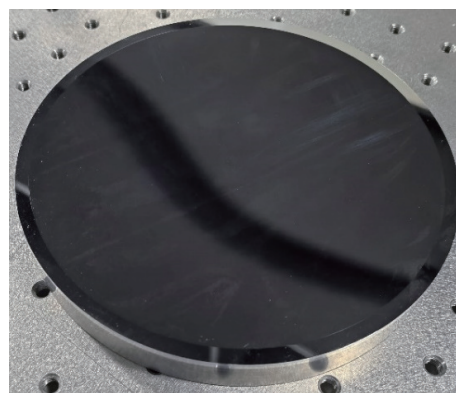


图 3 待测非球面

Fig.3 Tested aspheric mirror

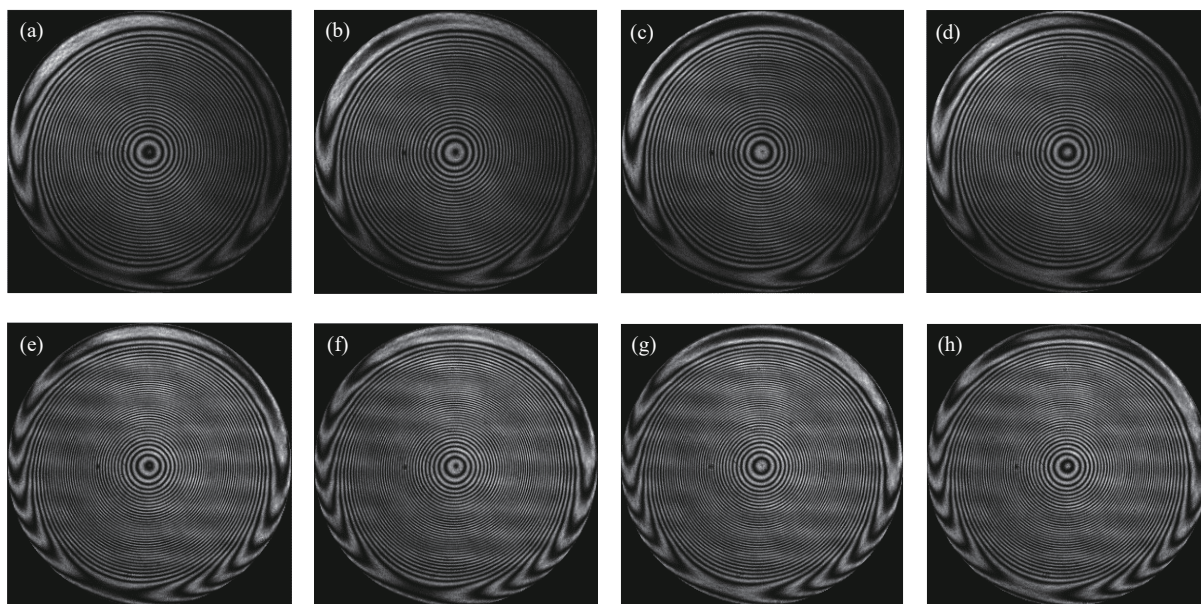


图 4 单波长四步移相干涉图

Fig.4 Interferograms for 4-step phase shifting

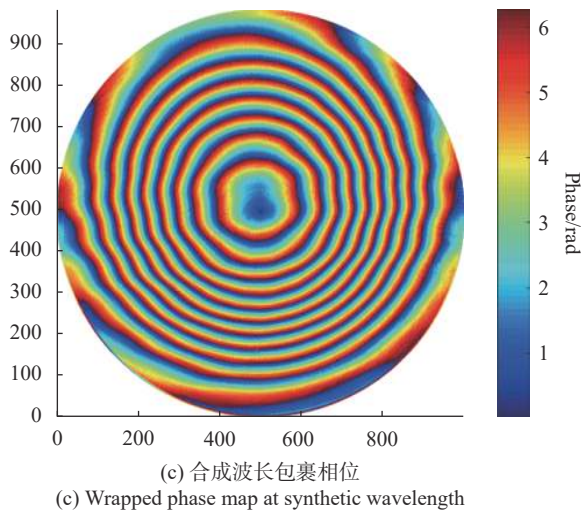
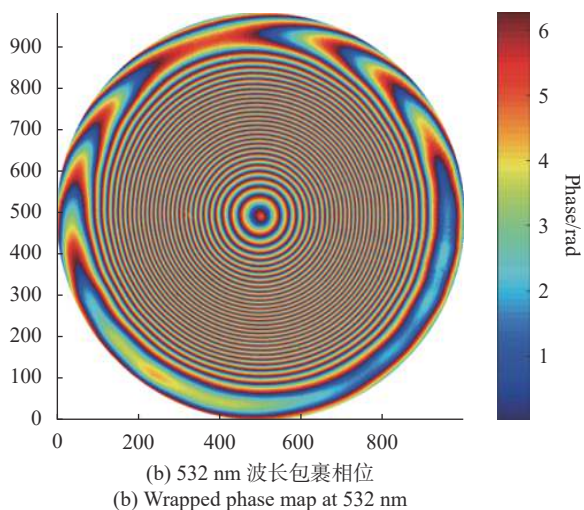
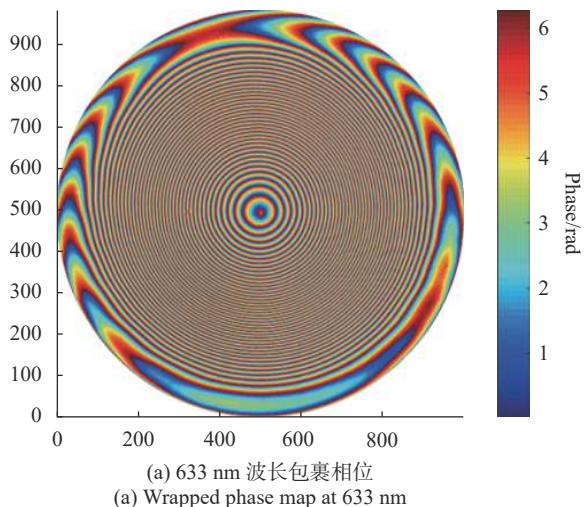


图 5 测得的非球面的包裹相位图

Fig.5 Wrapped phase maps for tested aspheric surface

形结果,得到十次测量值平均之后的非球面面形 PV 值为  $4.1527\ \mu\text{m}$ ,RMS 值为  $1.0453\ \mu\text{m}$ ,十次面形 PV 值和面形 RMS 值见表 1,非球面面形结果图如图 6 所示。

表 1 非球面测试面形 PV 和 RMS 值  
Tab.1 PV values and RMS values of tested aspheric

No.	PV/ $\mu\text{m}$	RMS/ $\mu\text{m}$
1	4.1578	1.0449
2	4.1598	1.0452
3	4.1593	1.0453
4	4.1600	1.0457
5	4.1587	1.0460
6	4.1551	1.0461
7	4.1509	1.0459
8	4.1452	1.0453
9	4.1416	1.0446
10	4.1384	1.0439

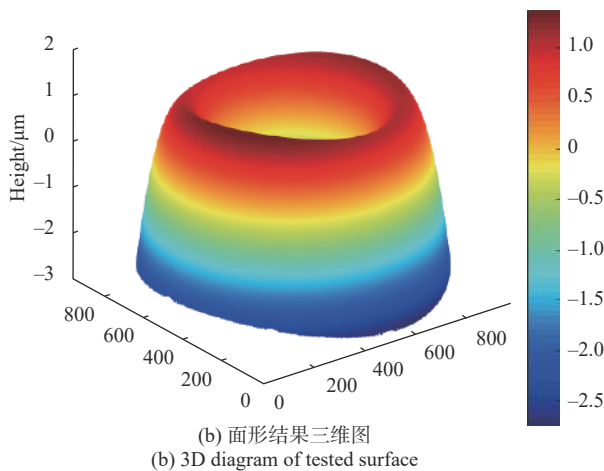
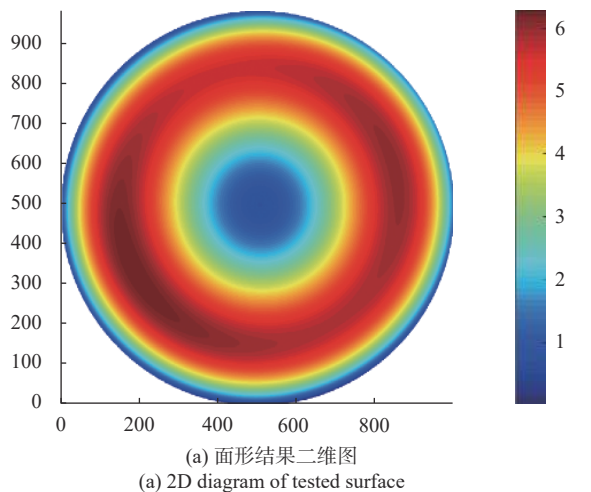


图 6 全视场外差移相双波长干涉测量系统面形结果

Fig.6 Surface maps of full-field heterodyne phase shifting two-wavelength interferometer system

实验中使用 Zygo Verifire 型菲索干涉仪检测该待测非球面作为标准进行比对。Zygo 干涉仪测试结

果同样通过泽尼克拟合去掉平移、倾斜、离焦项,该非球面面形的 PV 值为  $3.9735\ \mu\text{m}$ , RMS 值为  $1.09\ \mu\text{m}$ , 面形结果如图 7 所示。

比较两系统测试结果可以看出,搭建的全视场外差移相双波长干涉测量系统的 PV 值测试精度为  $\lambda/3.53(\lambda=633\ \text{nm})$ , PV 值测试重复精度为  $\lambda/77.38$ , RMS 值测试精度为  $\lambda/14.16$ , RMS 值测试重复精度为  $\lambda/919.10$ 。

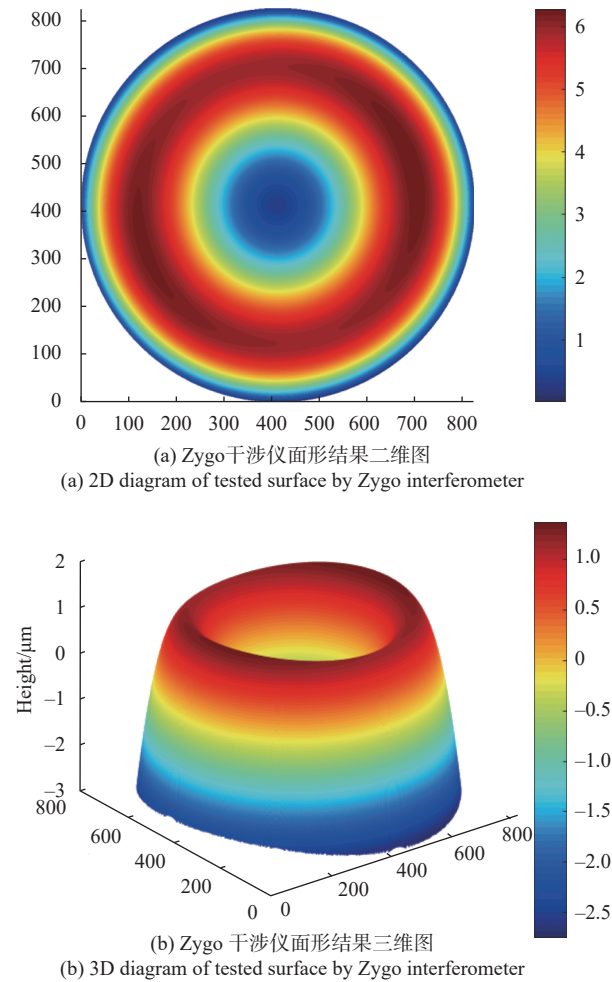


图 7 干涉仪面形结果

Fig.7 Surface maps of Zygo interferometer

### 2.3 台阶测试实验

阶跃型元件是一类重要的光学元件,对于干涉测量而言,大于测试波长一半高度台阶元件的高精度测量也是一个难题,利用全视场外差移相双波长干涉测量技术的优势可以解决该问题。为进行验证,选取一标准台阶面进行测量,台阶高度标称为  $(1.3\pm 0.1)\ \mu\text{m}$ 。

将两单波长和合成波长的包裹相位分别解包裹,之后去除平移和倾斜项,得到的两单波长和合成波长

台阶图如图 8 所示,由图 8(a)、(b)可以明显看出,单波长测得的高度信息有误,合成波长对测得的十次高度值平均得到该台阶高度为  $1.2522\ \mu\text{m}$ ,十次高度测量值见表 2。

使用 Sensofar S neox 光学轮廓仪对该台阶进行测

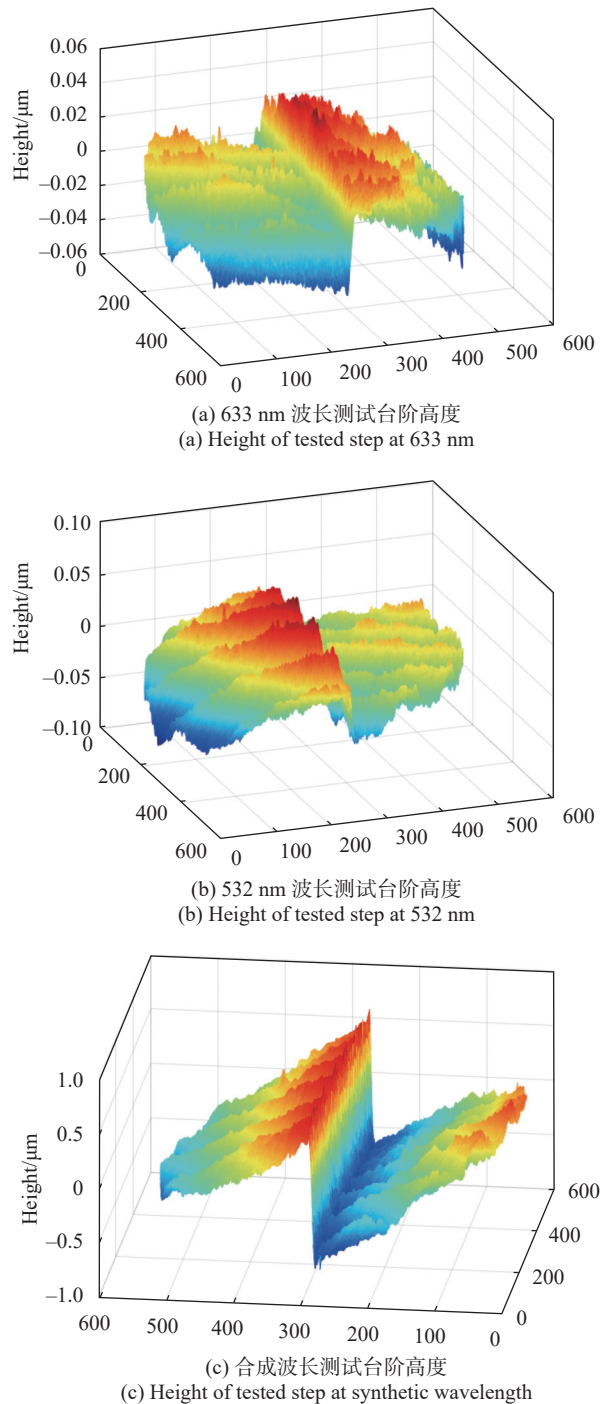


图 8 全视场外差移相双波长干涉测量系统台阶测试结果

Fig.8 Step height maps of full-field heterodyne phase shifting two-wavelength interferometer system

表 2 台阶高度值  
Tab.2 Heights of step

No.	Height/ $\mu\text{m}$
1	1.2527
2	1.2542
3	1.2510
4	1.2522
5	1.2505
6	1.2554
7	1.2491
8	1.2509
9	1.2511
10	1.2546

量,其测量结果作为标准与自测结果进行比对。图 9 为 Sensofar S neox 光学轮廓仪的测试结果图。其测得台阶高度为 1.2913  $\mu\text{m}$ 。

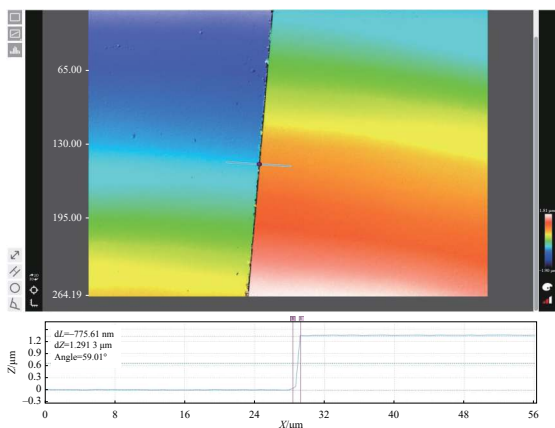


图 9 Sensofar S neox 光学轮廓仪台阶高度结果

Fig.9 Step height of Sensofar S neox 3D optical profiler

比较全视场外差移相双波长干涉测量系统与 Sensofar S neox 光学轮廓仪对同一台阶测试的结果可知,该全视场外差移相双波长干涉测量系统的台阶高度测量精度为  $\lambda/16.19$ ,台阶高度测试重复精度为  $\lambda/311.85$ 。

### 2.4 实验结果分析与讨论

由 2.2 节非曲面测试实验和 2.3 节台阶测试实验结果可以看出,全视场外差移相双波长干涉测量系统能以较高的精度完成非球面与阶跃型元件的测试,验证了全视场外差移相双波长干涉测量技术的可行性,其运用于测试连续表面或者阶跃型表面有不错的表

现,但其结果相较于成熟仪器测出的结果仍存在一定的误差。

对比图 6 和图 7 的二维面形可以看出,相较于图 7,图 6 的面形轮廓有一定的误差,这可能是光路中元件倾斜等因素导致两波长光未完全重合,两测量结果相互错开使得面形轮廓出现问题;也可能是标准球面波发生镜消色差不理想<sup>[4]</sup>,系统中两单波长产生的球面波前有所差别,最终在测量结果中引入了误差。而从图 8 可以看出,台阶测试中测出的面形结果含有一些周期性的条纹,这可能是系统中相干噪声造成的,会对台阶的测量结果造成误差。后期通过提高两种波长干涉光路的同轴合束精度、对标准球面波发生镜消色差优化设计、抑制系统的相干噪声等可以使得测量精度进一步提升。

### 3 结 论

介绍了一种全视场外差移相双波长干涉测量方法。该方法可以兼顾实现高的测量动态范围与高测量精度,外差光源配合全视场外差方法,简化了移相过程且实现较为方便。经过实验测试,系统可以测试偏离参考面程度较大的非球面,最终测得的非球面面形 PV 值测试精度为  $\lambda/3.53$  ( $\lambda=633\text{ nm}$ ), PV 值测试重复精度为  $\lambda/77.38$ , RMS 值测试精度为  $\lambda/14.16$ , RMS 值测试重复精度为  $\lambda/919.10$ ;也可以测试高度合成波长一半左右的台阶且台阶高度测量精度为  $\lambda/16.19$ ,测试重复精度为  $\lambda/311.85$ 。可以预见,后续通过改善双波长的光路对准问题,设计优化干涉仪的光学系统,使用误差消除算法等方式可以优化测试效果。而通过对声光调制器驱动频率、相机帧率更加严格的控制,增加移相步数则可以进一步提升移相精度,提高相位测量准确度;减少两单波长间隔则可以形成更长的合成波长,使得测试的动态范围进一步增大,有望对更大偏离程度的非球面和更高的台阶进行快速的精密测量。

### 参考文献:

[1] Deck L, Groot P D. High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(31): 7334-7338.  
[2] Wang Xiaokun. Measurement of large aspheric surface by



- stitching and coordinate measuring machine [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3410-3415. (in Chinese)
- [3] Stedman M, Lindsey K. Limits of surface measurement by stylus instruments [C]//Proceedings of SPIE, 1989, 1009: 56-61.
- [4] Liu Dong, Yan Tianliang, Wang Daodang, et al. Review of fringe-projection profilometry and phase measuring deflectometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0917001. (in Chinese)
- [5] Mohammadi F, Kofman J. Multi-wavelength digital-phase-shifting Moiré based on Moiré wavelength [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(9): 1917.
- [6] Cheng Y Y, Wyant J C. Two-wavelength phase shifting interferometry [J]. *Applied Optics*, 1985, 23(24): 4539.
- [7] Ishii Y, Onodera R. Two-wavelength laser-diode interferometry that uses phase-shifting techniques [J]. *Optics Letters*, 1991, 16(19): 1523-1525.
- [8] Hariharan P, Roy M. Achromatic phase-shifting for two-wavelength phase-stepping interferometry [J]. *Optics Communications*, 1996, 126(4-6): 220-222.
- [9] North-Morris M B, Millerd J E, Brock N J, et al. Phase-shifting multiwavelength dynamic interferometer [C]//Proceedings of SPIE, 2004, 5531: 64-75.
- [10] Hsieh H C, Chen Y L, Jian Z C, et al. Two-wavelength full-field heterodyne interferometric profilometry [J]. *Measurement Science & Technology*, 2009, 20(2): 025307.
- [11] 李迎春. 双波长移相干涉术的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [12] 张聪喆. 双波长光干涉光学系统设计与移相仿真研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [13] 田雪. 基于双波长移相干涉的光学非均匀性检测技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [14] Chen Jinlong. Research on the technology for the high precision testing of the three-dimensional shape with steps by dual-wavelength phase shift interferometry[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [15] Shang Wanqi, Zhang Wenxi, Wu Zhou, et al. Three-dimensional measurement system based on full-field heterodyne interferometry [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(10): 2097-2104. (in Chinese)
- [16] Ru Hongwu, Wu Lingling, Zhang Wenxi, et al. Full-field heterodyne white light interferometry [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(2): 190617. (in Chinese)
- [17] Wu Zhou, Li Yang, Xiangli Bin, et al. Full-field heterodyne long-cavity interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019(9): 0912003. (in Chinese)
- [18] Lv Tong, Zhang Wenxi, Lu Xiaoyu, et al. Full-field heterodyne short coherent topography measurement technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(4): 800-807. (in Chinese)
- [19] Cheng Y Y, Wyant J C. Phase shifter calibration in phase-shifting interferometry [J]. *Applied Optics*, 1985, 24(18): 3049-3052.
- [20] Creath K. Comparison of phase-measurement algorithms [C]//Proceedings of SPIE, 1987, 0680: 939587.
- [21] Malacara Z, D Malacara. Design of lenses to project the image of a pupil in optical testing interferometers [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(4): 739-742.
- [22] Tkaczyk T S, Jozwicki R. Experimental and numerical models of a field heterodyne interferometer: Discussion on optical influences in measurements [C]//Proceedings of SPIE, 2000, 4076: 397950.
- [23] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 355.
- [24] Yu Yingjie, Chang Lin, Yan Ketao, et al. Information separation of multi-surface based on wavelength phase shifting interferometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303014. (in Chinese)
- [25] Creath K, Cheng Y-Y, Wyant J C. Contouring aspheric surfaces using two-wavelength phase-shifting interferometry [J]. *Optica Acta*, 1985, 32(12): 1455-1464.
- [26] Wang Huaying, Liu Zuoqiang, Liao Wei, et al. Comparison of four phases unwrapping algorithm based on method of minimum norm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2): 0209016. (in Chinese)