

文章编号 1004-924X(2025)07-1019-12

基于双棱镜的全视场外差干涉测量

焦琪璐^{1,2}, 朱聪慧¹, 吕彤¹, 伍洲^{1,2}, 张文喜^{1,2*}

(1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

2. 中国科学院大学光电学院, 北京 100049)

摘要: 为了提升全视场外差干涉仪的测量适用性,降低寄生波、混频对干涉仪测量结果的影响,实现高精度低噪声的动态干涉测量,提出了基于双棱镜新型干涉仪构型。该系统能够适用于全视场外差动态干涉测量技术,解决混频对测量结果的影响,进一步降低寄生波对测量结果的影响,同时采用光纤出射的理想光代替参考面,能够避免参考面不均匀对测量精度的影响。解释了干涉仪的基本构型,描述了测量原理,对提出的双棱镜结构的寄生波进行建模仿真,对混频误差进行论证,并进行了寄生波、混频情况的实验验证。实验结果表明:发散结构寄生波相对平行光结构寄生波自然对数量级相差最高为 3.2,该构型无混频因素的影响,在测量反射率为 3% 的元件时,引入的面形测量误差相对泰曼构型优于 0.015 λ ,与仿真结果一致。基于双棱镜的全视场外差干涉测量技术提升了测量适用性,降低寄生波混频对干涉仪中低频率测量结果的影响,抑制了混频的影响,进一步提升了干涉仪的测量精度。

关键词: 干涉测量;双棱镜构型;全视场外差;寄生波;混频

中图分类号: O436.1; TH744 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253307.1019

CSTR: 32169.14.OPE.20253307.1019

Full-field heterodyne dynamic interferometric measurement with double-prism configuration

JIAO Qilu^{1,2}, ZHU Conghui¹, LYU Tong¹, WU Zhou^{1,2}, ZHANG Wenxi^{1,2*}

(1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: zhangwenxi@aoe.ac.cn

Abstract: To improve measurement applicability and reduce the impact of stray light and frequency mixing on interferometric results, a high-precision, low-noise dynamic interferometric measurement system is proposed. This system is based on a novel double-prism dynamic interferometer design, suitable for full-field heterodyne dynamic interferometric measurement techniques. It addresses the effects of frequency mixing on measurement results, further mitigates the influence of stray light, and utilizes ideal fiber-optic output to replace the reference surface, thereby avoiding the impact of reference surface nonuniformity on measurement accuracy. This paper explains the basic configuration of the interferometer, describes the measurement principles, models and simulates stray light in the new double-prism structure, provides additional analysis on frequency mixing errors, and presents experimental validation of stray light and frequen-

收稿日期: 2025-01-09; 修订日期: 2025-02-10.

基金项目: 中国科学院科研仪器设备研制项目(No. PTYQ2024TD0036)

cy mixing effects. Experimental results show that the stray light in the divergent structure differ by up to an order of magnitude of 3.2 compared to those in the parallel light structure. This configuration is free from frequency mixing effects. When measuring a component with a 3% reflectivity, the introduced surface shape measurement error is less than 0.0155λ relative to the Twyman-Green configuration, which is consistent with simulation results. The full-field heterodyne dynamic measurement technique based on the double-prism configuration enhances measurement applicability, reduces the impact of stray light frequency mixing on low-frequency measurement results, suppresses the effects of frequency mixing, and further improves the measurement accuracy of the interferometer.

Key words: interferometric measurement; double-prism configuration; full-field heterodyne; stray light; frequency mixing

1 引言

全视场外差干涉测量技术广泛应用于干涉测量领域,具有测量速度快、抗振性能好、测量精度高的优点。该技术通过声光移频器使得两束光存在稳定差频,利用探测器帧频匹配外差移相的帧频信息,实现全视场探测^[1-6]。相对于机械移相,外差移相在较大尺寸参考镜、准确控制移相间隔方面具有天然的优势,将移动参考镜间距移相的精度等效为移频驱动的精度,能够在保证高精度移相的情况下更快地获取物体面形以及透射波前信息。同时,相对于像面掩模板的偏振移相方式,外差移相在移相步数及数据处理算法上更加灵活。

全视场外差技术在采用长相干长度光源时,由于干涉仪内部存在较多平板元件,当平行光路通过该类平板元件后前后表面会产生多次反射寄生光,随主光线进入探测器,引入测量误差;两路外差光串扰进入另一光路,返回探测器会引入混叠的混频误差。因此,干涉仪测量元件的适用性、干涉仪内部寄生波、混频等误差的分析具有重要的研究意义。目前,针对寄生波、混频已有一定的研究基础^[7-10]。寄生波的抑制主要有算法去除^[11-12]、短相干光源^[13-16]、光源结构调整^[17]和表面处理等方法。其中,采用滤波修正方法对波前条纹噪声进行算法去除,应用到系统中会一定程度上影响干涉仪的对与寄生条纹同频信息的测量精度,从而影响干涉仪的仪器传递函数(Instrument Transfer Function, ITF)^[11-12, 18];短相干光源

在光程匹配上操作复杂,调节困难,对设备要求高,不适用于大口径长焦球面元件的测量^[13-16];双光源干涉法通过互不相干的双光束进行光路结构匹配来消除杂散光,能够抑制被测件引入寄生波的影响,但是对系统内部平行元件产生的寄生波仍然没有很好的根除,并且会引入一定的结构复杂性^[17];表面涂抹凡士林等方法不能用于干涉仪内部的透射光路,同时表面不易清洁,会影响表面质量^[12]。波前干涉仪混频误差的抑制,主要通过控制偏振元件的相对位置关系降低偏振混叠程度来实现^[19],但在被测件反射率较低时,测量光路能量增强导致进入探测器的基础混叠光束能量增强,会进一步提升混频的影响。

本文基于全视场外差干涉测量的原理,针对干涉仪不同类型结构对元件测量的限制,以及干涉仪内部寄生波、混频等系统噪声,提出了一种新的干涉测量结构,能够从原理上解决混频对测量结果的影响,降低寄生波对测量结果的影响程度,同时使用长相干长度光源,保障测量的操作简易性。

2 原理

2.1 寄生波理论

寄生波主要是在测量的传播路径中经由干涉仪内部元件表面反射、散射、衍射等光束返回探测面引入的像差,由于干涉仪的内部元件多镀有增透膜,误差的主要来源为元件表面的一次反射及二次反射等高质量回光(即反射杂散光)对测量结果的影响。

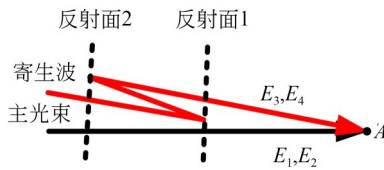


图1 寄生波光路示意图

Fig. 1 Optical path of stray light

如图1所示,假定参考的起始光束,与测量的移频光束对应的主光束波函数形式为 E_1, E_2 ,到达探测器A点位置;另一位置光线经过多次反射到达探测器A点位置的寄生波为 E_3, E_4 。此处主要分析二次反射结果,在探测面的光强信息对应两光束杂散光的影响,实际的光束波函数形式如下:

$$\begin{aligned}
 E_1 &= A_1 \exp[i(\omega_1 t + \varphi_1)] \\
 I_1 &= A_1^2(1 + r_1^2) + A_2^2(1 + r_2^2) + 2(r_1 A_1^2 \cos \Delta\varphi_1 + r_2 A_2^2 \cos \Delta\varphi_2) \\
 I_2 &= 2A_1 A_2 S \\
 \cos \varphi &= \frac{\cos \varphi_{12} + r_1 r_2 \cos(\varphi_{12} + \Delta\varphi_{12}) + r_1 \cos(\varphi_{12} + \Delta\varphi_1) + r_2 \cos(\varphi_{12} - \Delta\varphi_2)}{S} \\
 \sin \varphi &= \frac{\sin \varphi_{12} + r_1 r_2 \sin(\varphi_{12} + \Delta\varphi_{12}) + r_1 \sin(\varphi_{12} + \Delta\varphi_1) + r_2 \sin(\varphi_{12} - \Delta\varphi_2)}{S} \\
 S &= \{[\cos \varphi_{12} + r_1 r_2 \cos(\varphi_{12} + \Delta\varphi_{12}) + r_1 \cos(\varphi_{12} + \Delta\varphi_1) + r_2 \cos(\varphi_{12} - \Delta\varphi_2)]^2 + \\
 &\quad [\sin \varphi_{12} + r_1 r_2 \sin(\varphi_{12} + \Delta\varphi_{12}) + r_1 \sin(\varphi_{12} + \Delta\varphi_1) + r_2 \sin(\varphi_{12} - \Delta\varphi_2)]^2\}^{1/2}
 \end{aligned} \quad (3)$$

φ_{12} 为理想测量路、参考路的相位差值, $\Delta\varphi_{12}$ 为测量路与参考率的寄生波的额外相位差值,则对应的相位误差为:

$$\delta\varphi = \varphi - \varphi_{12} = \arctan \varphi - \varphi_{12} = \theta, \quad (4)$$

其中 θ 可以由式(5)得到:

$$\begin{aligned}
 \cos \theta &= \frac{1 + r_1 r_2 \cos \Delta\varphi_{12} + r_1 \cos \varphi_1 + r_2 \cos \Delta\varphi_2}{S_2} \\
 \sin \theta &= \frac{r_1 r_2 \sin \Delta\varphi_{12} + r_1 \sin \varphi_1 + r_2 \sin \Delta\varphi_2}{S_2} \\
 S_2 &= [(1 + r_1 r_2 \cos \Delta\varphi_{12} + r_1 \cos \Delta\varphi_1 + r_2 \cos \Delta\varphi_2)^2 + \\
 &\quad (r_1 r_2 \sin \Delta\varphi_{12} + r_1 \sin \Delta\varphi_1 + r_2 \sin \Delta\varphi_2)^2]^{1/2}. \quad (5)
 \end{aligned}$$

由此可知,影响相位误差的主要因素为两寄生波产生的额外相位差 $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \Delta\varphi_{12}$,以及两寄生波的路径振幅反射率 r_1, r_2 ,与两束主光线的相位差 φ_{12} 无关。

假定测量的A,B两点之间的光程差(前文分析过不相关)为0,分析寄生波相位 $\Delta\varphi_{12}$ 对实际测量误差 $\delta\varphi$ 的影响,反射表面的能量反射率 R_1 ,

$$E_2 = A_2 \exp[i(\omega_2 t + \varphi_2)]$$

$$E_3 = r_1 A_1 \exp[i(\omega_1 t + \varphi_1 + \Delta\varphi_1)], \quad (1)$$

$$E_4 = r_2 A_2 \exp[i(\omega_2 t + \varphi_2 + \Delta\varphi_2)]$$

其中: r_1 和 r_2 为两光波波函数的寄生波相对实际光束的振幅比值,由传播路径中各元件表面的反射率和透射率决定,在图1中为反射面1和反射面2的振幅反射率的乘积; ω_1, ω_2 为两光的角频率; φ_1 为起始光束的相位信息, φ_2 为含差频路光束的相位信息; $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ 为两光束寄生波引入的额外相位变量。

在探测面上的干涉光强信息如下:

$$\begin{aligned}
 I &= |E_1 + E_2 + E_3 + E_4| \cdot |E_1 + E_2 + E_3 + E_4|^* = \\
 &= I_1 + I_2 \cos(\omega_{12} t + \varphi), \quad (2)
 \end{aligned}$$

其中: ω_{12} 为两光束角频率的差, φ 为实际求得的相位值, I_1, I_2 可表示为:

R_2 ,此处主要分析二次反射引入的影响。因此,假定实际对应振幅的 r_1, r_2 对应两次反射的结果,与单表面的能量反射率一致,同时,两束光均包含两种偏振态的光线,令两束光的能量反射率一致为 R ,对应寄生波引入的误差随着实际寄生波之间的相位差变化如图2所示。

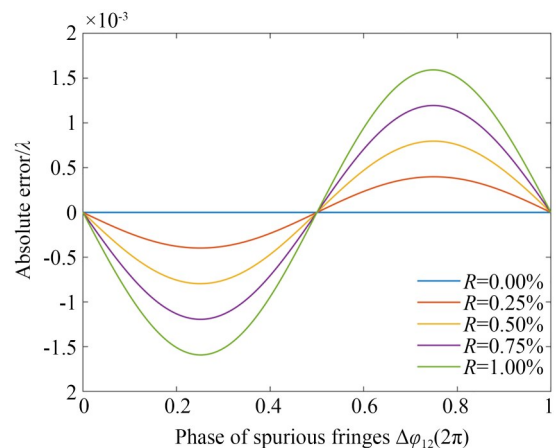


图2 仿真相位误差随寄生波的相位变化

Fig. 2 Phase error simulation vs. stray light phase

实际引入计算的误差与寄生波之间的相位差存在正弦性要求,寄生波相对主光线的相位差主要和两束光之间的角度以及平板厚度和倾斜角度相关,尺寸不同的元件存在误差,因此,进行计算时需要遍历 $0 \sim 2\pi$ 的结果。

遍历 $0 \sim 2\pi$ 的寄生波相位差,分析不同表面反射率对二次反射误差影响的最高值,如图 3 所示。可以看出,二次反射寄生波产生面的反射率控制在 0.63% 以下,可以将寄生波误差降低到 $0.1\% \lambda$ 以下;反射率控制在 0.06% 以下,可以将寄生波误差降低到 $0.01\% \lambda$ 左右。

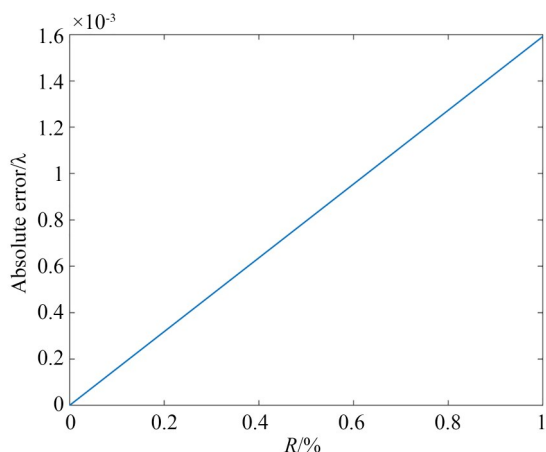


图 3 仿真结果误差随反射率的变化

Fig. 3 Variation of simulation error with reflectivity

一次反射的寄生波在反射率上与二次反射存在开方关系,产生的误差与图 3 误差一致,对应产生面的反射率控制在 0.1% 以下,可以将寄生波误差降低到 0.005λ 以下;反射率控制在 0.4% 以下,可以将寄生波误差降低到 0.01λ 以下。通常在干涉仪内部通过镀高透膜的方法来降低寄生波的量级。目前,常见的镀膜最高能达到 99.8% 的增透,不能满足 0.1% 以下反射率,因此主要的一次反射情况需要尽量避免,二次反射情况要尽量控制。

2.2 发散光路寄生波分析

发散光束通过棱镜的过程避免平行光束通过平板产生与主光束形态一致的平行寄生波光束。为简化分析且增强分析的普适性,这里针对发散光束通过分光棱镜以及干涉仪常见的各种平板元件,经过多次反射引入的寄生波进行建

模。如图 4 所示,深色线条为发散的主体光束的光线示意,浅色线条为该光线产生的寄生光线示意,平板元件前后表面适用于后续双棱镜方案中发散光束通过的分光棱镜入射表面和出射表面的情况。

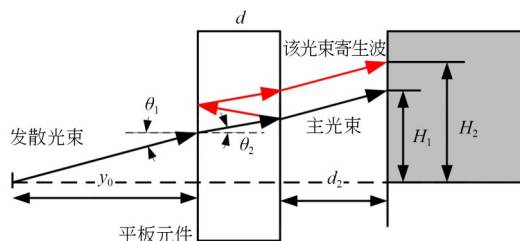


图 4 发散光路寄生波

Fig. 4 Divergent optical path with stray light

杂散光出射光源点相对直接点光源出射过平板光束的偏心为:

$$\sin \theta_1 = n \sin \theta_2$$

$$L_1 = \frac{y}{\cos \theta_1} + \frac{d}{\cos \theta_2} + \frac{d_2}{\cos \theta_1}$$

$$L_2 = \frac{y}{\cos \theta_1} + \frac{3d}{\cos \theta_2} + \frac{d_2}{\cos \theta_1} \quad (6)$$

$$H_1 = (y_0 + d_2) \tan \theta_1 + d \tan \theta_2$$

$$H_2 = (y_0 + d_2) \tan \theta_1 + 3d \tan \theta_2$$

其中: d 为平板元件尺寸,此处为棱镜厚度; d_2 为出射表面与探测器之间的距离; θ_1 为光线入射角; θ_2 为光线折射角,元件接近平行的情况下,元件内部的反射角度近似为 θ_2 ; L_1 为光线光程差, L_2 为光线寄生波引入的光程差; H_1 为光线高度, H_2 为该光线产生的寄生波高度。

在探测面上发散光束 2 经平板元件前后表面反射产生的寄生波 2 与另一角度发散光束 1 的主

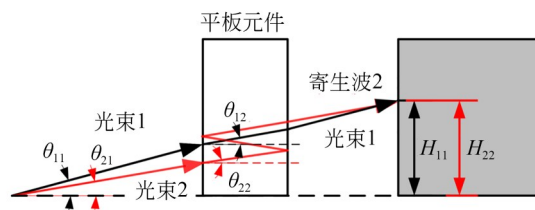


图 5 发散光路光线与寄生波的光程差

Fig. 5 OPD between divergent light and stray light

光束在像面交汇干涉,式(6)满足:

$$\begin{aligned} \sin \theta_{11} &= n \sin \theta_{12} \\ \sin \theta_{21} &= n \sin \theta_{22} \\ H_{11} &= H_{22} \\ H_{11} &= (y_0 + d_2) \tan \theta_{11} + d \tan \theta_{12} \\ H_{22} &= (y_0 + d_2) \tan \theta_{21} + 3d \tan \theta_{22} \end{aligned} \quad (7)$$

其中: θ_{11} 为光线1的入射角, θ_{12} 为光线1的折射角, θ_{21} 为光线2的入射角, θ_{22} 为光线2的折射角, H_{11} 为光线1的高度, H_{22} 为光线2产生的寄生波高度。

主光线与寄生波之间的光程差为:

$$\begin{aligned} \Delta L &= \frac{y_0}{\cos \theta_{11}} + \frac{d}{\cos \theta_{12}} + \frac{d_2}{\cos \theta_{11}} - \\ &\quad \frac{y_0}{\cos \theta_{21}} - \frac{3d}{\cos \theta_{22}} - \frac{d_2}{\cos \theta_{21}}. \end{aligned} \quad (8)$$

因此对应不同角度产生的光程差为非线性关系,如图6所示。

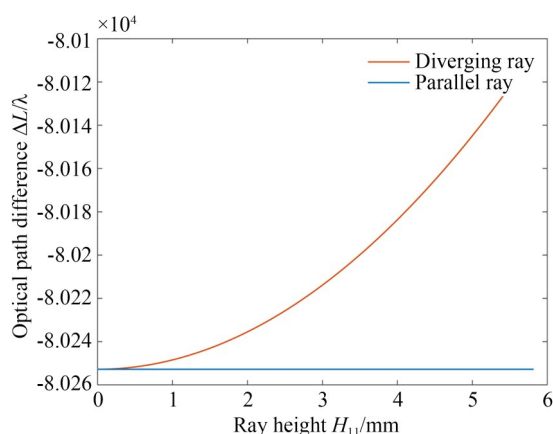


图6 光程差与光线高度的关系

Fig. 6 Relationship between OPD and ray height

2.2.1 寄生条纹能量

由于球面波光强与传播距离 L 的平方成反比,随着光程的增大,球面波能量进一步降低,进一步抑制寄生波对光路干涉的影响,如图7所示。

2.2.2 计算误差

球面波寄生波引入的计算误差如图8所示,此时要求寄生波与主光线的相位差恒定。实际由于面形加工非理想平行,寄生波与主光线存在相位差,因此对应平面波寄生波会引入计算误差。

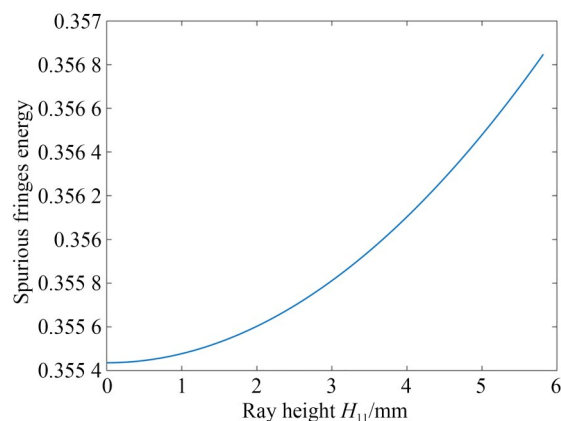


图7 杂散条纹能量与光线高度的关系

Fig. 7 Spurious fringes energy vs. ray height

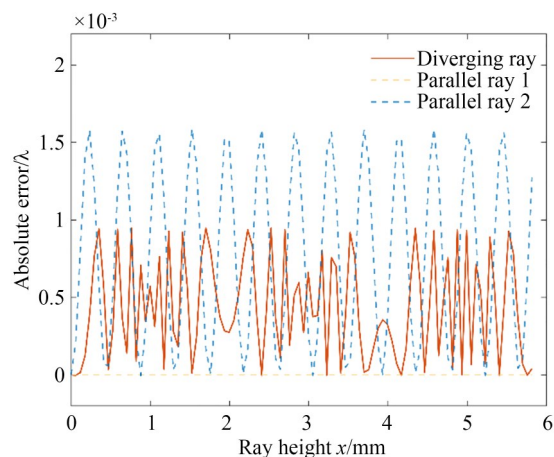


图8 计算误差与光线高度的关系

Fig. 8 Relationship between absolute error and ray height

2.2.3 频率信息

平行光路的寄生波的误差分布为正弦曲线样式,其幅值与反射率相关,周期与寄生波相对主光线角度相关,发散光路的寄生波引入的计算误差幅值相对减少了1/3,同时寄生波随像面位置变化不再是单一正弦频率,分散为多个频率信息,进一步降低了单一频域分量的分布量级,寄生波误差信号提取的频率信息如图9所示。

虚线为平行光路寄生波误差分布的频率信息,寄生波引入的误差集中在单一频率上;实线为发散光路寄生波误差分布的频率信息,寄生波引入的误差分散在各个频率段之间,进一步降低干涉仪对单个频率信号光采集的误差影响,

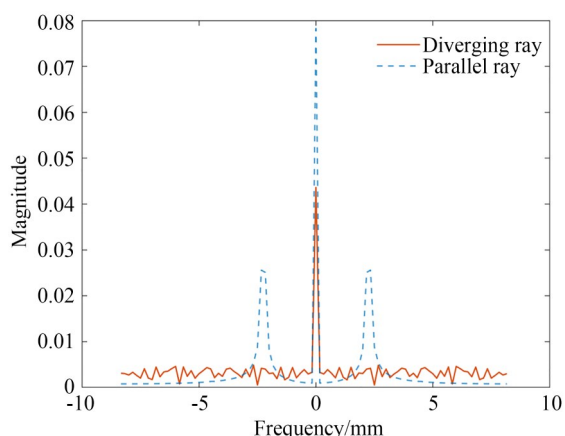


图9 含寄生波条纹误差分布的频域信息

Fig. 9 Frequency spectrum of error with stray light

提升了测量精度。

2.3 建模仿真

在 Zemax 中对厚度为 25.4 mm, 99.5% 镀膜的平板单向光束光路进行非序列建模, 主要结构如图 10 所示。

干涉测量常在多条纹情况下进行, 此时测量光与参考光通常并非完全理想同向, 因此, 单向

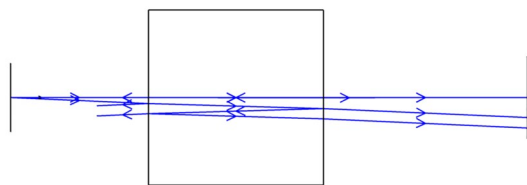
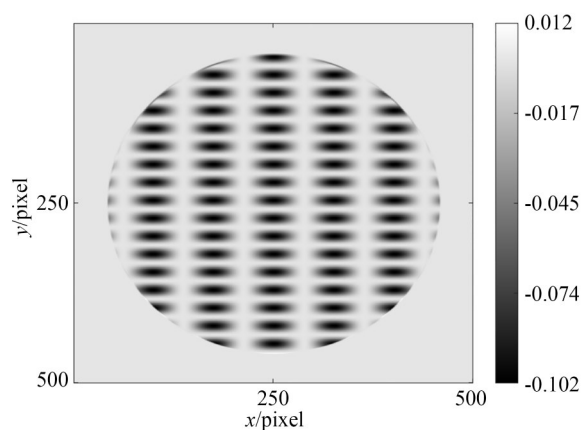
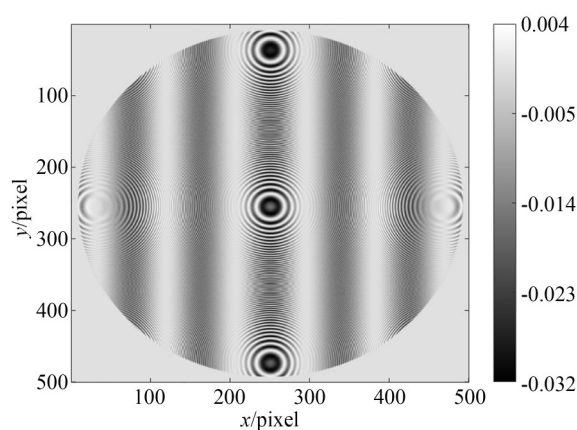


图10 发散光路寄生波建模

Fig. 10 Stray light model in divergent optical path

光路中设置测量光、参考光两路光束。为了更直观表示干涉现象, 根据发散光路特性在两路光束之间引入 0.02 mm 的偏心量, 以保证主光束干涉约六根条纹偏移量。平板元件并非完全理想平行, 目前棱镜加工平行度在 $<5'$ 量级, 因此, 设置平板元件前后表面平行度为 $1.2'$, 以更直观地表征寄生条纹。在探测面位置处存在 4 束光干涉, 包含测量光、参考光主光束, 以及二者经过平板元件二次反射引入的寄生光束。由于寄生波条纹变化相对于主光线能量变化较小, 约为 10^{-3} 量级, 因此, 将含寄生条纹的探测器相干强度与理想情况的探测器相干强度相减, 更直观地显示寄生波, 具体结果如图 11(b) 所示。平行光束入射平板的情况如图 11(a) 所示, 根据平行光路特性, 在两束光之间引入 $1.2'$ 的倾斜量, 以同样保证两束光之间的干涉约 6 根条纹偏移量。发散光路寄生波引起的能量起伏约为平行光路的 31%, 对应的光强横截面分布如图 11(c) 所示。对光强横截面分布结果提取的频率信息如图 11(d) 所示, 发散光路频率分布相对 0 频的比例为 2.7%, 平行光的寄生波频率相对 0 频分布的比例为 50%, 发散光相对值降低一个数量级, 对二维光强信息提取频域信息取自然对数, 结果如图 11(e)~11(f) 所示。平行光路存在明显的主光线频域信息以及寄生波频域信息, 频域分布与主光线引入寄生波导致的额外相位差相关。发散光路的二维频域信息基本为均匀分布, 除主光线频率处信息无明显寄生波频率信息, 两者数量相差 5~7.2 个自然对数量级。

(a) 平行光束干涉光强分布
(a) Intensity distribution of parallel rays(b) 发散光路光强分布
(b) Intensity distribution of diverging rays

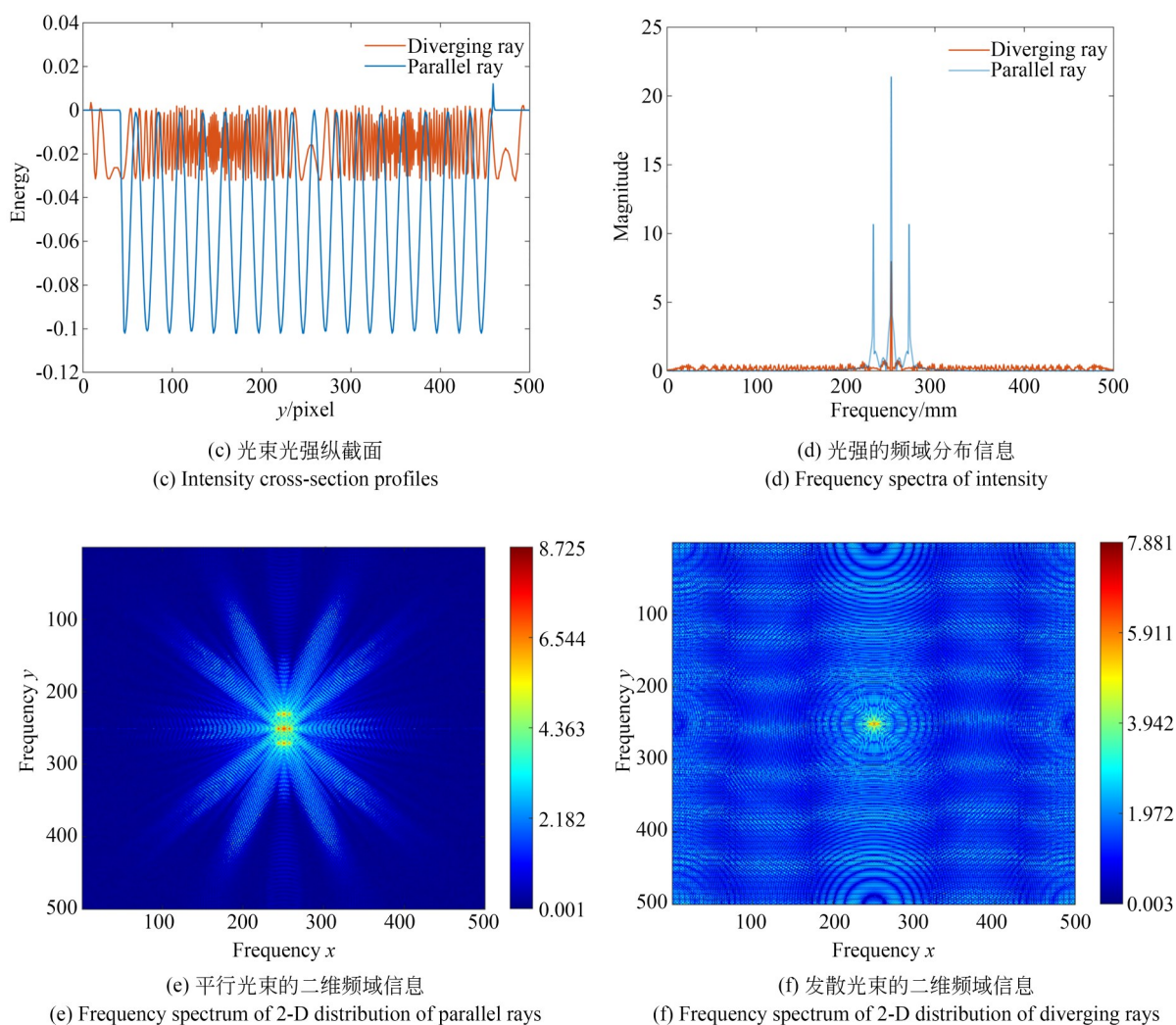


图 11 发散光路对干涉寄生波的影响

Fig. 11 Effect of divergent path on stray light

3 全视场外差双棱镜干涉仪

针对发散光路对寄生波误差的优化,本文设计了一种基于双棱镜构型的全视场外差动态干涉仪,其基本结构模型如图 12 所示。该结构以外差移相为核心,整体结构由一个双频光源和双棱镜干涉测量模块组成。

双频光源模块由光源发出 633 nm 窄线宽激光束,经一分二光纤分路,一路光路包含电动可调衰减片,控制该路光的能量强度变化;一路包含级联声光移频器,通过移频驱动控制产生几十甚至上百 Hz 量级的差频。两路光通过光纤出射空间光束,一路光通过 BS1 到成像镜 L2,最终到达像面作为参考光;另一路移频光束通过 BS2 出

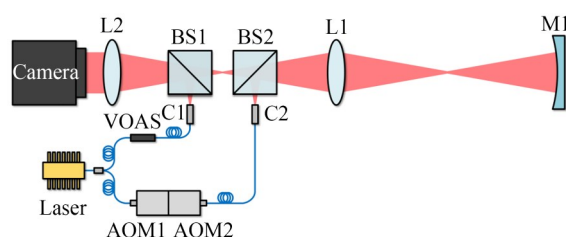


图 12 全视场外差动态干涉仪系统的结构示意图

Fig. 12 Framework of full-field heterodyne dynamic interferometer

射,经过 L1 进行会聚,获得高精度球面波,作为测量光到达被测镜。通过被测镜反射光路回到 L1,经过 BS2,BS1,透射光到达成像镜 L2,最终成像在探测器上,与参考光束干涉,由探测器采

集干涉信号强度 I , 满足:

$$I(t) = I_1 + I_2 \cos[2\pi\Delta ft + \Delta\varphi], \quad (9)$$

其中: I_1 为背景光强信号, I_2 为干涉调制光强, $\Delta\varphi$ 为参考信号与测量信号的光程差, 控制探测器采样帧频 $1/t$ 为级联声光移频器产生的差频 Δf 的 N 倍。采样信号与 N 步移相信号匹配, $N=4$ 时, 探测器在一个周期内对应四步移相的采样信号强度信息如下:

$$\begin{aligned} I(t_1) &= I_1 + I_2 \cos[\Delta\varphi] \\ I(t_2) &= I_1 + I_2 \cos\left[\frac{\pi}{2} + \Delta\varphi\right] \\ I(t_3) &= I_1 + I_2 \cos[\pi + \Delta\varphi] \\ I(t_4) &= I_1 + I_2 \cos\left[\frac{3\pi}{2} + \Delta\varphi\right] \end{aligned} \quad (10)$$

4 双棱镜结构对混频的改进

双棱镜方案能够从结构上避免混频现象的发生, 如图 13(a) 所示。该方案将参考率与测量路分开出射, 以光纤头直接出射能量 I_2 作为参考光, 经过 BS1 反射后直接到达探测器表面, 对应能量 $I_{22'}$; 光纤头直接出射能量 I_1 作为测量光, 经 BS2 出射到达被测件, 再通过 BS2, BS1 返回探测器表面, 对应能量 $I_{11'}$ 。测量光与参考光干涉产生干涉条纹, 测量光路与参考光路之间无光束混叠情况, 改变测量光和参考光的能量不会在测量结果中引入混频影响。

混频效应是指两路光束泄漏到另一路的情况。在全视场外差泰曼格林干涉仪中, 混频主要由泰曼格林干涉主体中的 PBS2 与双频正交光源合束 PBS1 之间位姿、路径引入偏振态未对准所致, 如图 13(b) 所示。 I_1, I_2 为入射的两种频率的主光束, 经过 PBS2 分光后, I_1 主光束反射到 I_{11} , 到达像面位置为 $I_{11'}$ (框线部分), 少部分光束透射到 I_{12} , 成为混频光 $I_{12'}$; 同理, I_2 主光束透射到 I_{22} , 到达像面位置为 $I_{22'}$ (框线部分), 少部分光束透射到 I_{21} , 成为混频光 $I_{21'}$ 。此种情况主要是 PBS 的透光轴没有与起始透光轴重合引起的^[19]。混频与 PBS1 和 PBS2 之间的透光轴的夹角有关, 当夹角 $\geq 2^\circ$ 时, 混频量级 $\geq 0.01\lambda$, 所以应注意控制夹角, 避免夹角过大引入较大的混频误差。

尽管控制两 PBS 之间的相对夹角, 在测量低反射率元件时, 由于主光线返回能量减少, 相对

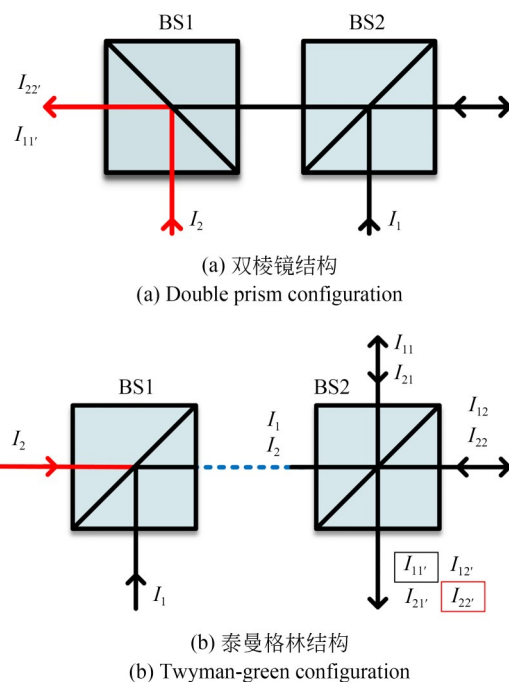


图 13 外差干涉测量的混频信息

Fig. 13 Mix frequency of heterodyne interferometric measurement

主光线入射到另一路的混频光能量与主光线入射能量相关, 进而会增强混频效应。混频误差与被测件反射率的关系如图 14 所示, 在 0.03 反射率时, 混频引起的误差在 0.015λ 量级。

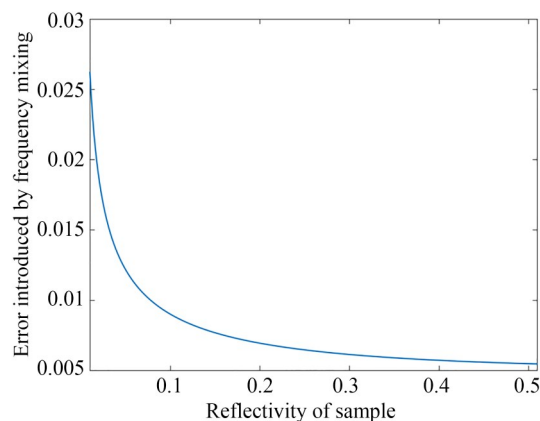


图 14 发散光路寄生波

Fig. 14 Errors introduced by frequency mixing in divergent optical path

双棱镜方案直接将两路光拆开输入, 从结构上避免了两路光混频对测量结果的影响, 进一步降低了光路调节要求, 有助于干涉仪的装调与搭建。

5 实验

5.1 寄生波实验

为了验证发散光路对寄生波的抑制效果,本文搭建了双棱镜的单端发散光路实验系统,如图15所示。发散光系统采用633 nm窄线宽双频光源输入,差频为400 Hz,移频光通过光纤头1入射空间光系统,通过25.4 mm宽的BS透射到达探测器,可调节光通过光纤头2入射空间光系统,通过BS反射到达探测器。探测器采用1 600帧频,分辨率为 $1\,024 \times 1\,024$ 的CMOS相机采集5幅图像,对采集图像进行计算获得干涉信息,对干涉结果进行二维频域分析,得到的自然对数结果如图16(a)所示。

平行光路计算面形频域信息取自然对数,结果如图16(b)所示。平行光路计算面形频域信息(图16(b))相对发散光路计算面形频域信息(图16(a))存在多余的频率信息,该信息相对中心点

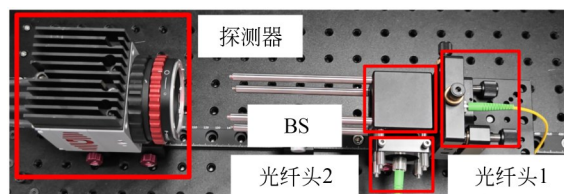
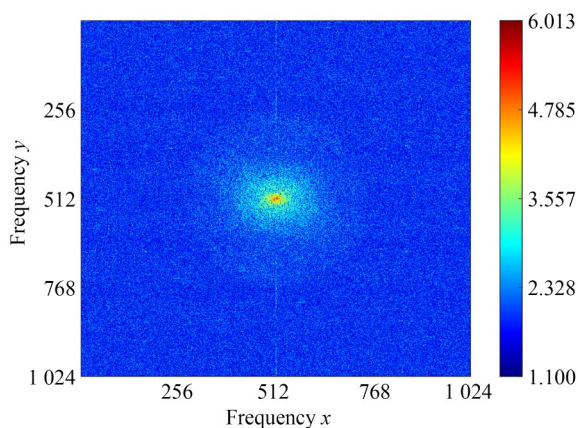


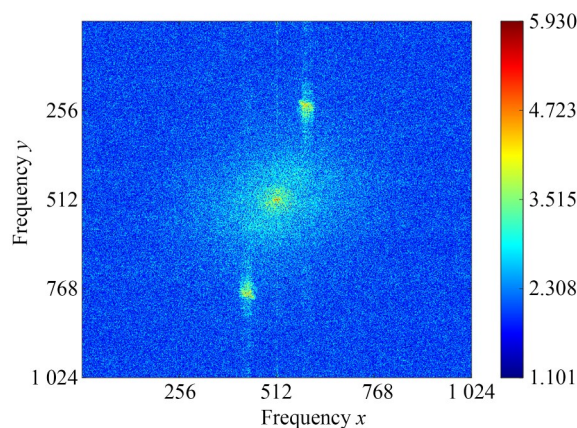
图15 发散光路实验系统

Fig. 15 Experimental system of divergent optical path

对称分布,对应特定空间频域的寄生波条纹。平行光路与发散光路计算面形的频域信息图相减后取对数,对应平行光路多余寄生条纹的频率信息位置处对数量级最高相差3.2。发散光路的寄生条纹不再是单一特定频率,各个频率寄生条纹分量分散了对测量结果的影响。实验结果与仿真结果接近,数量差最高值小于仿真结果的原因主要为BS表面反射率低于0.5%,使得平行光路寄生波量级进一步下降,降低了平行光路寄生波对测量结果的影响。



(a) 发散光路计算面形频域信息
(a) Frequency spectrum of surface profile of diverging rays



(b) 平行光路计算面形频域信息
(b) Frequency spectrum of surface profile of parallel rays

图16 实验系统寄生波结果

Fig. 16 Stray light results of experimental system

5.2 混频实验

为了验证双棱镜结构光路对混频的抑制情况,本文搭建了双棱镜动态干涉实验系统,其光路结构如图17所示。

光纤1输入400 Hz移频光束,通过BS1反射到准直镜,经过准直镜准直到达CMOS探测器;光纤2输入可调衰减的光束,通过BS2反射到达出射镜,经过3%反射率被测镜反

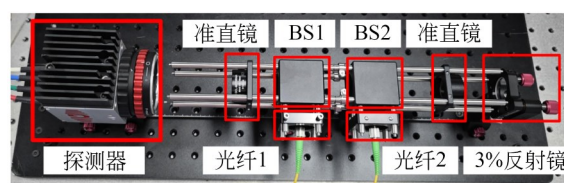


图17 双棱镜动态干涉实验系统

Fig. 17 Dynamic interference experimental system with double prisms

射,再经过出射镜进入 BS2,BS1 到达准直镜,回射光最终到达探测器与光纤 1 输入的参考光进行干涉,测量结果如图 18(a)和 18(c)所示。

图 18(b)和 18(d)为课题组研发的全视场外差泰曼格林型干涉仪对 3% 反射率被测镜面形

的采集图像与解算面形。从实验结果可以看出,双棱镜结构测量相对泰曼格林结构测量结果不存在混频的影响。从图 18(e)可以看出,计算结果误差的峰谷值约为 0.0155λ ,与仿真结果一致,采用双棱镜能够有效提升测量计算的准确度。

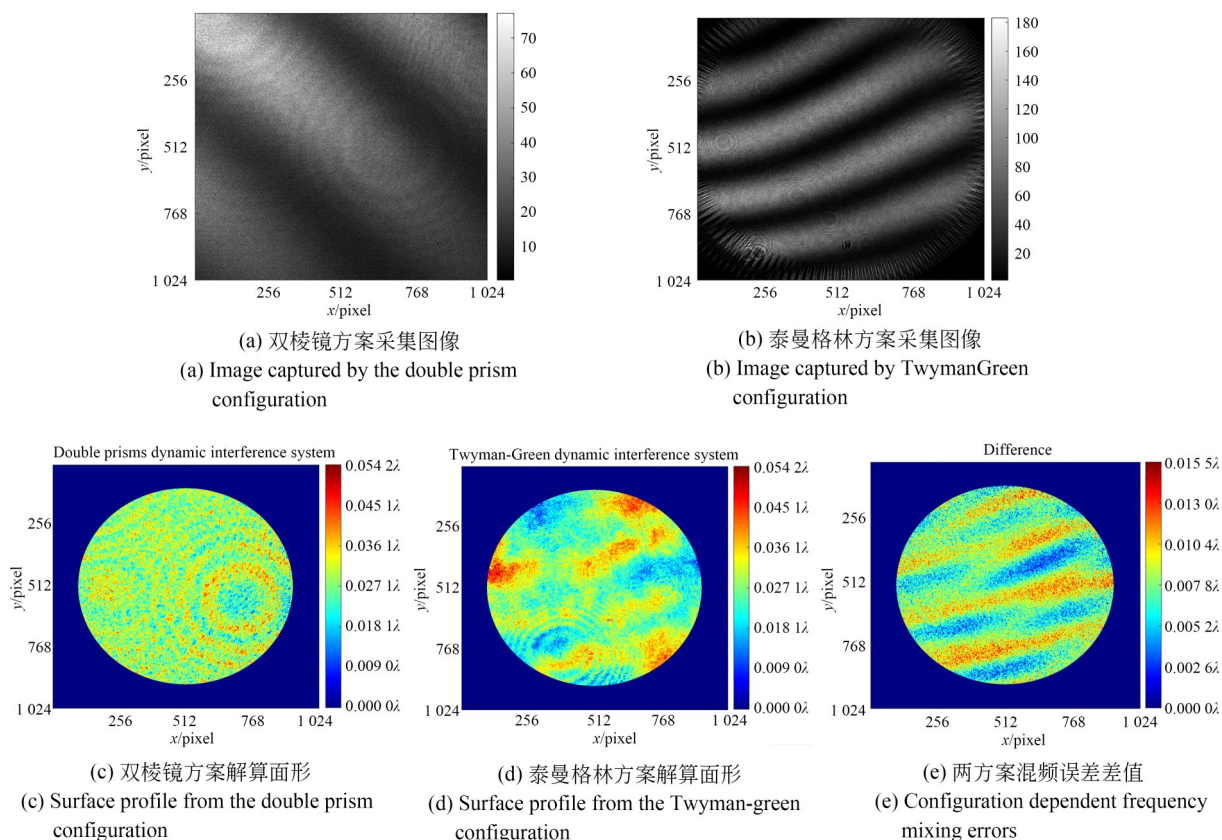


图 18 实验系统的混频结果

Fig. 18 Frequency mixing results of experimental system

6 结 论

本文提出了一种新的双棱镜干涉仪构型,能够用于全视场外差动态干涉仪中,采用长相干长度光源提升元件测量适用性。对全视场外差动态干涉仪内部寄生波产生的原理模型进行建模,寄生波对测量误差的影响主要受元件表面反射率、元件引起的寄生波相位差相关,当元件反射率大于 0.6% 时,二次反射误差高于 0.001λ ,进一步分析了混频与被测件反射率的影响,被测件反射率小于 3% ,混频引入误差高

于 0.0155λ 。针对双棱镜结构进行了非序列光能量仿真,对平行、发散光路寄生波情况进行分析,当采用发散光路替代平行光路时,寄生波的能量降低一个量级,空间频率信息不再单一,能够有效降低寄生波对测量结果的影响。双棱镜结构在原理上避免了两频率光的相互混叠,抑制了混频对测量结果的影响。最后,搭建实验验证了 BS 平板情况的平行光路、发散光路寄生波情况,搭建双棱镜结构验证了混频情况,与非序列仿真情况相符合。

除了对寄生波、混频的作用,双棱镜方案采

用光纤出射的理想光代替参考面,能够避免参考面不均匀对测量精度的影响。由于双棱镜方案中参考光和测量光路分离,会引入额外的光程误差,通过系统设计和精密装调可以降低此类误差对测量结果的影响。在后续的工作中,将对干涉仪系统设计、回程误差优化等进行进一步的研究。

参考文献:

- [1] 伍洲,李杨,相里斌,等.全视场外差长腔干涉测量技术[J].光学学报,2019,39(9):0912003.
WU ZH, LI Y, XIANG L B, *et al.* Full-field heterodyne long-cavity interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0912003. (in Chinese)
- [2] 吕彤,张文喜,吕笑宇,等.全视场外差短相干形貌测量技术[J].光学精密工程,2020,28(4):800-807.
LÜ T, ZHANG W X, LÜ X Y, *et al.* Full-field heterodyne short coherent topography measurement technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(4): 800-807. (in Chinese)
- [3] 樊国翔,李杨,张文喜,等.全视场外差移相双波长干涉面形检测技术[J].红外与激光工程,2022,51(9):132-140.
FAN G X, LI Y, ZHANG W X, *et al.* Full-field heterodyne phase shifting two-wavelength interferometry surface testing technologies [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(9): 132-140. (in Chinese)
- [4] 尚万祺,张文喜,伍洲,等.全视场外差干涉三维测量系统[J].光学精密工程,2019,27(10):2097-2104.
SHANG W Q, ZHANG W X, WU ZH, *et al.* Three-dimensional measurement system based on full-field heterodyne interferometry[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(10): 2097-2104. (in Chinese)
- [5] 刘博.全视场外差斐索干涉仪技术研究[D].西安:西安工业大学,2020.
LIU B. *Research on Full Field Heterodyne Fizeau Interferometer Technology* [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2020. (in Chinese)
- [6] 王之昊,张文喜,伍洲,等.激光测振仪中最小均方误差前向预测器的研究[J].光电工程,2022,49(5):210391.
WANG ZH H, ZHANG W X, WU ZH, *et al.* Re-

作者贡献声明:

焦琪璐:论文构思和撰写,测量实验的设计及数据整理和分析;

朱聪慧:论文审核与编辑;

吕彤:背景调研;

伍洲:测量实验数据分析;

张文喜:测量方法的提出。

- search on the forward predictor of minimum mean square error in laser vibrometer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2022, 49(5): 210391. (in Chinese)
- [7] WU C M. Periodic nonlinearity resulting from ghost reflections in heterodyne interferometry [J]. *Optics Communications*, 2003, 215(1/2/3): 17-23.
- [8] 邓元龙,李学金,柴金龙,等.寄生虚反射对外差干涉椭圆测量的影响[J].光学技术,2009,35(3):415-418.
DENG Y L, LI X J, CHAI J L, *et al.* Influence of parasitic ghost reflection on measurement in a heterodyne interferometric ellipsometer[J]. *Optical Technique*, 2009, 35(3): 415-418. (in Chinese)
- [9] SUN Y T, CHENG Q, HU H X, *et al.* Research on coherent stray light fringes in interference compensation testing[J]. *Photonics*, 2024, 11(1): 74.
- [10] ERSKINE D J, EGGERT J H, CELLIERS P M, *et al.* Ghost fringe removal techniques using Lissajous data presentation[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(3): 033106.
- [11] TANG C X, WEN S L, ZHANG Y H, *et al.* A method for removing spurious fringes based on characteristic spectrum band-stop filter[C]. *Optics Frontiers Online 2020: Optical Communications and Networks. July 24-25, 2020. Online Only, China*. SPIE, 2020: 16.
- [12] 徐凯源,李大海,刘昂,等.基于小波变换的平板波前死条纹噪声滤除方法[J].中国激光,2020,47(9):904008.
XU K Y, LI D H, LIU A, *et al.* Filtering method of fixed pattern noise in window wavefront based on wavelet transform [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 904008. (in Chinese)
- [13] 樊孝贺.短相干菲索型动态干涉仪的关键技术研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2019.
FAN X H. *Research on the Key Technologies of Low-Coherence Fizeau Dynamic Interferometer*

- [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [14] KIMBROUGH B, MILLERD J, WYANT J, *et al.* Low-coherence vibration insensitive Fizeau interferometer[C]. *Interferometry XIII: Techniques and Analysis*. San Diego, California, USA. SPIE, 2006: 62920F.
- [15] 孙沁园, 陈磊, 郑东晖, 等. 采用短相干光源的动态斐索干涉仪[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(2): 220001.
SUN Q Y, CHEN L, ZHENG D H, *et al.* Dynamic Fizeau interferometer using low-coherence light source[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(2): 220001. (in Chinese)
- [16] WU Z, ZHANG W X, BIN X L, *et al.* Full-field heterodyne dynamic interferometry based on hertz-level low differential-frequency acousto-optic frequency shifter[C]. *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection X*. Munich, Germany. SPIE, 2017: 1032905.
- [17] LIU Z Q, GEMMA T, UDAGAWA S, *et al.* Double-source interferometry for reducing spurious noise fringes[C]. *Interferometry XII: Techniques and Analysis*. Denver, CO. SPIE, 2004: 193.
- [18] 樊耀轩, 张文喜, 伍洲, 等. 干涉仪仪器传递函数噪声容限分析与优化[J]. 光学精密工程, 2024, 32(11): 1653-1666.
FAN Y X, ZHANG W X, WU ZH, *et al.* Analysis and optimization of noise tolerance for interferometer instrument transfer function[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(11): 1653-1666. (in Chinese)
- [19] 杨宇琦, 李杨, 吕彤, 等. 混频对全视场外差动态干涉仪测量精度的影响[J]. 光学精密工程, 2023, 31(9): 1267-1276.
YANG Y Q, LI Y, LÜ T, *et al.* Influence of frequency mixing on measurement accuracy of full-field heterodyne dynamic interferometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(9): 1267-1276. (in Chinese)

作者简介:



焦琪璐(1998—),女,山东青岛人,博士研究生,2020年于天津大学获得学士学位,主要从事光学精密检测技术的研究。E-mail: jiaoqilu20@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:



张文喜(1979—),男,安徽宿州人,博士,研究员,博士生导师,2003年于中国科学技术大学获得学士学位,2006年于中国科学院西安光学与精密机械研究所获得硕士学位,2014年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事三维精密测量、激光干涉测量和振动测量的研究。E-mail: zhangwenxi@aoe.ac.cn