

标定误差对色散条纹共相误差检测影响的修正

张春悦^{1,2}, 徐抒岩¹, 许博谦¹, 齐鑫^{1,2}, 鞠国浩¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 色散条纹共相误差检测技术需要以一定的方法对采集的色散条纹图像进行分析处理, 才能得到所对应的平移误差值。与其他色散条纹分析方法相比, 主峰位移提取法能够同时适用于大量程以及一个波长以内小量程的平移误差检测。但是, 该方法的检测精度容易受到条纹中心线标定误差的影响。为对该影响进行修正, 首先通过分析平移误差对双孔衍射图样的影响, 提出了一种条纹中心线位置自适应提取方法; 在此基础上, 结合主峰位移提取法的基本原理, 提出了修正条纹中心线标定误差影响的方法; 最后搭建实验光路, 验证了所提修正方法的有效性。实验结果表明, 在存在中心线标定误差的情况下, 所提方法能够取得小于 30 nm 的测量精度, 相比于修正之前精度大大提高。该方法有效地提高了主峰位移提取法的抗干扰能力与工程实用性。

关键词 成像系统; 色散条纹传感器; 共相误差检测; 色散条纹中心线; 标定误差; 主峰位移提取法

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0711003

Correction for Effect of Calibration Error on Accuracy of Co-Phasing Error Detection of Dispersed Fringe

Zhang Chunyue^{1,2}, Xu Shuyan¹, Xu Boqian¹, Qi Xin^{1,2}, Ju Guohao¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The dispersed fringe co-phasing error detection technology needs a certain method to analyze and process the acquired dispersed fringe image to obtain the corresponding piston error value. Compared with other dispersed fringe image processing methods, the main peak position extraction method can be applied to the detection of piston error in large range or in small range within one wavelength. However, the detection accuracy of the method is very sensitive to the calibration error in the central line position of the dispersed fringe. To modify the effect of this calibration error, this paper firstly proposes a self-adaptive extraction method for fringe central line position based on the analysis of the influence of the piston error on the diffraction pattern of double rectangle hole. Based on this, combined with the basic principle of the main peak position extraction method, a method of correcting the influence of fringe central line calibration error is proposed. Finally, an experimental light path is built to verify the effectiveness of the proposed correction method. The experimental results show that the proposed method can achieve a measurement accuracy of less than 30 nm in the presence of the central line calibration error, which is greatly improved compared to the accuracy before correction. This method effectively improves the anti-jamming capability and engineering practicality of the main peak position extraction method.

Key words imaging systems; dispersed fringe sensor; co-phasing error detection; central line of dispersed fringe; calibration error; main peak position extraction method

OCIS codes 110.6770; 110.1080; 010.7350; 120.4820; 120.5050

收稿日期: 2018-02-08; 收到修改稿日期: 2018-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(61205143)

作者简介: 张春悦(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事拼接型大口径成像系统主动光学波前传感方面的研究。

E-mail: zhangchunyue1992@163.com

导师简介: 徐抒岩(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间大口径光学望远镜和光学系统空间在轨组装方面的研究。E-mail: xusy@ciomp.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

天文学观测对提高望远镜性能提出了迫切需求,目前增加镜面口径是提升望远镜集光能力与分辨本领的有效手段。但望远镜主镜口径的增大和质量的急剧增加将导致单一型主镜结构在镜面加工、检测、支撑设计与轻量化以及运输、发射等方面存在一些困难。拼接式主镜结构是解决这些问题的有效途径,并且已成为大口径天文望远镜的发展趋势^[1-2]。

然而,拼接式主镜因其特有的多子镜拼接结构将导致装调难度的增加。有研究指出,当各子镜间共相位误差均方根值小于 $1/20$ 波长时,才能达到与单一型主镜等价的光学效果^[3]。共相位误差包含子镜间平移误差与倾斜误差两类,在实现各子镜共焦之后,倾斜误差已较小,但仍存在很大的平移误差。色散条纹传感技术是一种针对子镜间平移误差的检测方法,该方法使用宽光谱光源与色散元件,通过长基线干涉来消除检测时存在的 2π 不确定性问题,具有较大的平移误差检测量程。该方法已被詹姆斯·韦伯空间望远镜在轨装调过程所采用,作为粗共相过程中检测子镜间平移误差的主要手段^[4],并已成功实现对 Keck 望远镜的共相误差检测^[5-6]。

色散条纹传感技术需要以一定的方法对采集的色散条纹图像进行处理、分析,才能得到所对应平移误差的具体值。目前,基于色散条纹图像的平移误差提取方法主要有最小二乘拟合法^[7-10]、频域次峰位移提取法^[11-12]以及主峰位移提取(MPP)法^[13-14]等。然而前两种方法在子镜间平移误差较小时不适用。当平移误差接近一个波长或者在一个波长以内时,第一种方法所使用的有效信号已不足一个周期,无法保证拟合精度^[10];而频域中一个像素对应一个光相干长度,频域次峰位移量小于一个像素时,难以利用第二种方法计算平移误差值^[11]。并且前两种方法只对色散条纹图像进行空间频率信息提取^[15],未能充分利用色散条纹图像在衍射方向的信息。而MPP法能充分提取色散条纹图像信息,检测范围不受此限制,对粗共相过程与精共相过程的无缝衔接具有重要意义^[4]。

当前的平移误差检测精度依赖于色散条纹中心线标定精度,需要对探测器上色散条纹中心线的位置(子镜间无平移误差时,各波长衍射光强最大值位置连线)进行准确标定^[10,16]。然而即使能够在实验室条件下进行准确标定,在实际应用过程中,很可能由于外力作用或者其他因素的影响造成检测光源、

棱栅或者探测器的相对位置发生改变,导致实际条纹中心线位置偏离实验室条件下得到的标定位置,从而出现标定误差。若处理不当,这种标定误差会对MPP法的平移误差探测精度造成较大的影响。

本文从理论、仿真与实验等方面入手,重点针对如何消除标定误差对MPP法的影响进行了相关的研究。简要介绍了色散条纹图像产生的原理以及MPP法原理,研究了标定误差对MPP法的影响效果,提出了基于曲线拟合的条纹中心位置标定方法,以及修正标定误差影响的方法,最后通过仿真与实验验证了标定方法及修正方法的有效性。通过对MPP法进行改进,有效地提高了该方法用于检测平移误差时的抗干扰能力与工程实用性。

2 色散条纹图像以及 MPP 法原理

色散条纹图像的产生是基于复色光的双孔衍射与色散。以双矩形的干涉区域选择光阑覆盖拼接镜两子镜光束成像为例:由两块子镜反射的携带共相误差的波前在瞳面上分别通过干涉区域选择光阑的双孔发生衍射,在其后经棱栅发生色散,经透镜成像在探测器靶面,形成波长与光强分布关系相对应的色散条纹图像,如图1所示。

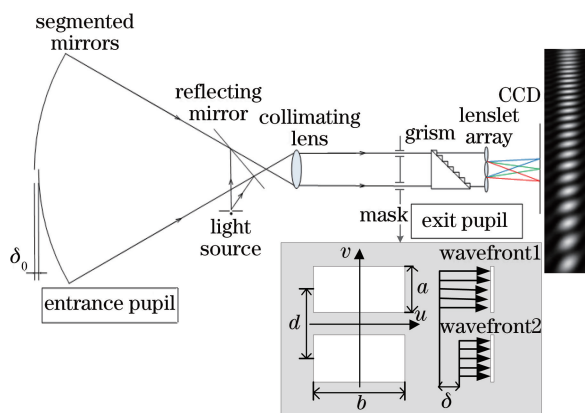


图1 色散条纹图像产生原理

Fig. 1 Production principle of dispersed fringe image

色散条纹图像上不同位置的光强分布可表示为^[13]:

$$I(x, y) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} 2 \left(\frac{ab}{\lambda f} \right)^2 \times \left\{ \text{sinc} \left(\frac{ay}{\lambda f} \right) \times \text{sinc} \left\{ \frac{b \{ x - f \cdot \tan[\varphi(\lambda)] \}}{\lambda f} \right\} \right\}^2 \times \left\{ 1 + \cos \left(\frac{2\pi\delta}{\lambda} + \frac{2\pi dy}{\lambda f} \right) \right\} d\lambda, \quad (1)$$

式中 a 、 b 和 d 分别为光阑的宽度、长度以及双孔中

心间距, $(\lambda_{\min}, \lambda_{\max})$ 为图像上波长 λ 的范围, f 为成像透镜等效焦距, $\varphi(\lambda)$ 为色散元件的色散角, δ 表示两子镜反射波面的光程差, 其值为两子镜间平移误差 δ_0 的两倍。

根据单色光双矩孔衍射原理, 可知光强峰值点位置随平面波相位差呈周期性变化^[13]。在一个周期内, 光强峰值相对于光程差为零时的位置偏移量与光程差之间近似呈线性关系:

$$\delta = \frac{y}{T} \lambda, \quad (2)$$

式中, y 为实际峰值偏移量, T 为最大偏移量。基于复色波的 MPP 法可以解决周期性问题。对于不同的波长, 相同的光程差将对应衍射方向上不同的峰值偏移量, 以及色散方向上不同的衍射级次。用 MPP 法对色散条纹图像进行二维信息提取, 如图 2 所示。

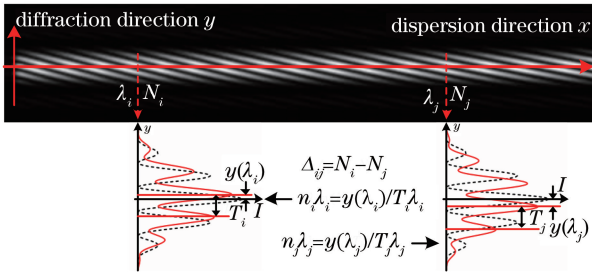


图 2 MPP 法对色散条纹图像的二维信息提取
Fig. 2 Two-dimensional information extraction of dispersed fringe image by the MPP method

可以建立如下关系式:

$$\begin{cases} \delta = N_i \lambda_i + n_i \lambda_i, & (N_i = 0, 1, 2, \dots, 0 \leq n_i < 1) \\ \delta = N_j \lambda_j + n_j \lambda_j, & (N_j = 0, 1, 2, \dots, 0 \leq n_j < 1) \\ n_i \lambda_i = \frac{y_i}{T_i} \lambda_i, & n_j \lambda_j = \frac{y_j}{T_j} \lambda_j, \\ \Delta_{ij} = N_i - N_j = \frac{\delta}{\lambda_i} - \frac{\delta}{\lambda_j}, & (\lambda_i < \lambda_j) \end{cases}, \quad (3)$$

式中, N_i, N_j 分别表示波长 λ_i 和 λ_j 处光程差包含整数波长的个数; n_i, n_j 分别表示光程差不足整数波长的部分; T_i, T_j 分别为两波长处最大偏移量, 其值为主峰与次峰间距; Δ_{ij} 表示波长 λ_i 和 λ_j 的干涉级次差值。利用该关系可以消除 2π 不确定性问题, 得到光程差为:

$$\delta = \frac{\lambda_i \lambda_j}{\lambda_j - \lambda_i} (\Delta_{ij} + n_i - n_j). \quad (4)$$

为得到上式中平移误差不足整数波长的部分, 利用 MPP 法检测平移误差, 需要确定对应波长光强峰值

相对于光程差为零时的位置的偏移量, 此位置即为色散条纹中心线位置, 因此色散条纹中心位置的标定尤为重要。

3 标定误差对 MPP 法影响的分析

在实验室与工程应用中, 一般采取滤波片定位波长标定的方式进行色散条纹中心位置标定。如图 3 所示, 由于存在滤波片定位误差, 实际波长标定点 (图中十字点) 相对于正常波长标定点 (图中圆点) 发生偏离; 另外可能由于外力作用或者其他因素的影响造成检测光源、棱栅相对探测器的位置发生改变, 这些都将导致真实色散条纹中心线位置偏离实验室条件下的标定位置, 此即为标定误差。将标定的中心线位置作为信号采集轴, 图 3 中红色虚线与蓝色实线分别表示实际信号与理想信号的采集轴, 二者发生的偏离将导致实际采集位置对应的波长与主峰位置偏移量不再是理想值, 从而使结果存在误差。

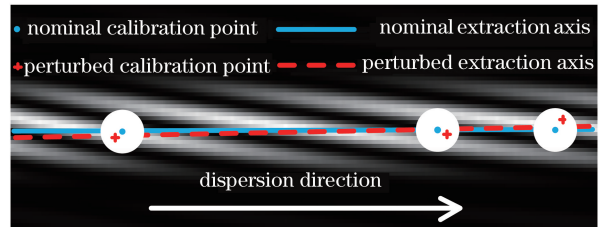


图 3 色散条纹中心线位置标定误差示意图
Fig. 3 Schematic of the calibration error for the central line position of dispersed fringe image

标定误差有两种形式, 表现为标定中心线相对于实际中心线的平移与旋转 (设旋转角度为 ϵ)。对于子镜间平移误差为 $-20 \mu\text{m}$ 的情形, 随着旋转角度的增大 (即中心线位置标定误差的增大), MPP 法的检测结果如表 1 所示 (计算所用的 $\lambda_i = 575 \text{ nm}$, $\lambda_j = 675 \text{ nm}$)。

由表 1 可见, 不存在标定误差时, MPP 法检测误差为 4 nm , 但随着标定误差的增大, MPP 法检测精度迅速降低。在旋转角为 1° 时, 误差已达到 $2.567 \mu\text{m}$, 此时已失去对 $2.5 \mu\text{m}$ 以下子镜间平移误差进行检测的能力; 在旋转角大于 0.4° 时, 误差已大于 $1 \mu\text{m}$, 此时已无法满足粗共相过程中将子镜间平移误差降到一个波长以内的要求, 无法保证粗共相与精共相过程的无缝衔接。

因此有必要针对标定误差对 MPP 法影响的修正方法进行研究, 即研究存在标定误差时的 MPP 法, 提高其在实际检测条件下的平移误差检测精度, 进而提高波前检测过程的可靠性。

表 1 平移误差为 $-20 \mu\text{m}$ 时,不同旋转角下 MPP 法的检测结果

Table 1 Detection results of the MPP method with different rotated angles when the piston error is $-20 \mu\text{m}$

Rotated angle $\epsilon / (^{\circ})$	Detected piston error $/\mu\text{m}$	Detected error $/\mu\text{m}$	Rotated angle $\epsilon / (^{\circ})$	Detected piston error $/\mu\text{m}$	Detected error $/\mu\text{m}$
0	-19.996	0.004	0	-19.996	0.004
0.2	-19.612	0.388	-0.2	-20.514	-0.514
0.4	-18.975	1.025	-0.4	-21.019	-1.019
0.6	-18.453	1.547	-0.6	-21.539	-1.539
0.8	-17.937	2.063	-0.8	-22.052	-2.052
1	-17.433	2.567	-1	-22.556	-2.556

4 标定误差对 MPP 法影响的修正方法

本节致力于研究在存在色散条纹中心线标定误差的情况下,如何提高 MPP 法的精度与可靠性。首先,提出一种自适应色散条纹实际中心线提取方法,可准确得到中心线偏转误差等参数;然后,根据得到的参数,对 MPP 法进行改进,以修正标定误差的影响。

4.1 色散条纹实际中心线位置标定方法

双孔衍射是由单孔衍射与双光束干涉共同调制的结果。对于双光束干涉现象而言,在双光束存在附加光程差时,在干涉方向 y 方向上,干涉条纹发生相应的位移,位移量与附加的光程差相关。而双孔衍射可看作是用单孔衍射的效果对双光束干涉效果进行调制的结果,以双矩形孔为例,其具体形式为^[17]:

$$I(x, y) = 4I_0 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \left[\cos \left(\frac{\varphi_0 + \varphi_\delta}{2} \right) \right]^2, \quad (5)$$

式中, $\left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2$ 与 $\left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2$ 为单矩形孔在 y 与 x 两个相互垂直方向的衍射因子 α 是一个与矩形孔宽度 a 、波长 λ 、坐标 y 以及焦距 f 有关的参数, β 是一个与矩形孔长度 b 、波长 λ 、坐标 x 以及焦距 f 有关的参数; $\left[\cos \left(\frac{\varphi_0 + \varphi_\delta}{2} \right) \right]^2$ 为两个等振幅、不同相位差的光束的干涉因子 φ_0 为一个与位置 y 有关的相位因子; I_0 为入射光强; $\varphi_\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \delta$ 为平移误差引起的相位差,以下称为平移相差。

为方便分析子镜间平移相差对双矩形孔衍射光强分布的影响,此处只考虑一个方向的光强分布,则(5)式可以改写为:

$$I(y) = 4I_0 \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha^2} \left[\cos \left(\frac{\varphi_0 + \varphi_\delta}{2} \right) \right]^2. \quad (6)$$

平移相差对双矩形孔衍射的影响如图 4 所示,在 $\varphi_\delta = 0$ 时,双光束干涉因子、单矩形孔衍射因子以及整个衍射图样的强度分布如图 4(a)、(c)以及(e)和(g)所示;在 $\varphi_\delta \neq 0$ 时,双光束干涉因子、单矩形孔衍射因子与衍射图样的强度分布如图 4(b)、(d)以及(f)、(h)所示。

图 4 中 m, n 分别为干涉与衍射级次。可见由于平移相差的存在,导致双光束干涉因子产生相移,从而引起最终衍射图样的变化,但平移相差并没有改变单孔衍射因子的变化。体现在双矩孔衍射图样上的效果是包络线的形状没有因为平移相差的存在而发生改变,只是内部各强度极大值的位置发生改变,而各强度极大值仍然落在包络线上。因此,已知各峰值的位置与强度值,拟合包络线的形状,其最大值位置即为不存在平移相差时强度的最大值位置。

沿着衍射方向(y 方向)对信号强度分布进行采样,确定各级干涉峰值的位置以及强度,即 $(y_m, I_m), m = 1, 2, 3, \dots$, 利用如下描述包络线形状的函数对该组数据进行拟合:

$$I = k \cdot \frac{\sin^2(y - b)}{(y - b)^2}, \quad (7)$$

得到实际 k 与 b 的值,而此处 b 的位置即为包络线顶点的位置。

沿着色散方向(x 方向)的 N 个不同位置处进行相同的处理,得到各波长位置对应的包络线顶点位置,对得到的一组坐标 $(x_i, b_i) (i = 1, 2, 3, \dots, N)$ 进行直线拟合,所得直线即为实际的色散条纹中心线位置。

4.2 标定误差对 MPP 法影响的修正方法

中心线标定位置相对于实际中心线位置的偏差可分解为中心线的平移与旋转误差。首先考虑最初标定的中心线相对于实际中心线在衍射方向上存在平移量 δ_L 的情况,对于两个波长 λ_i 和 λ_j 位置处峰值位置在中心线同侧时,实际的峰值偏移量 y'_i 与 y'_j 为:

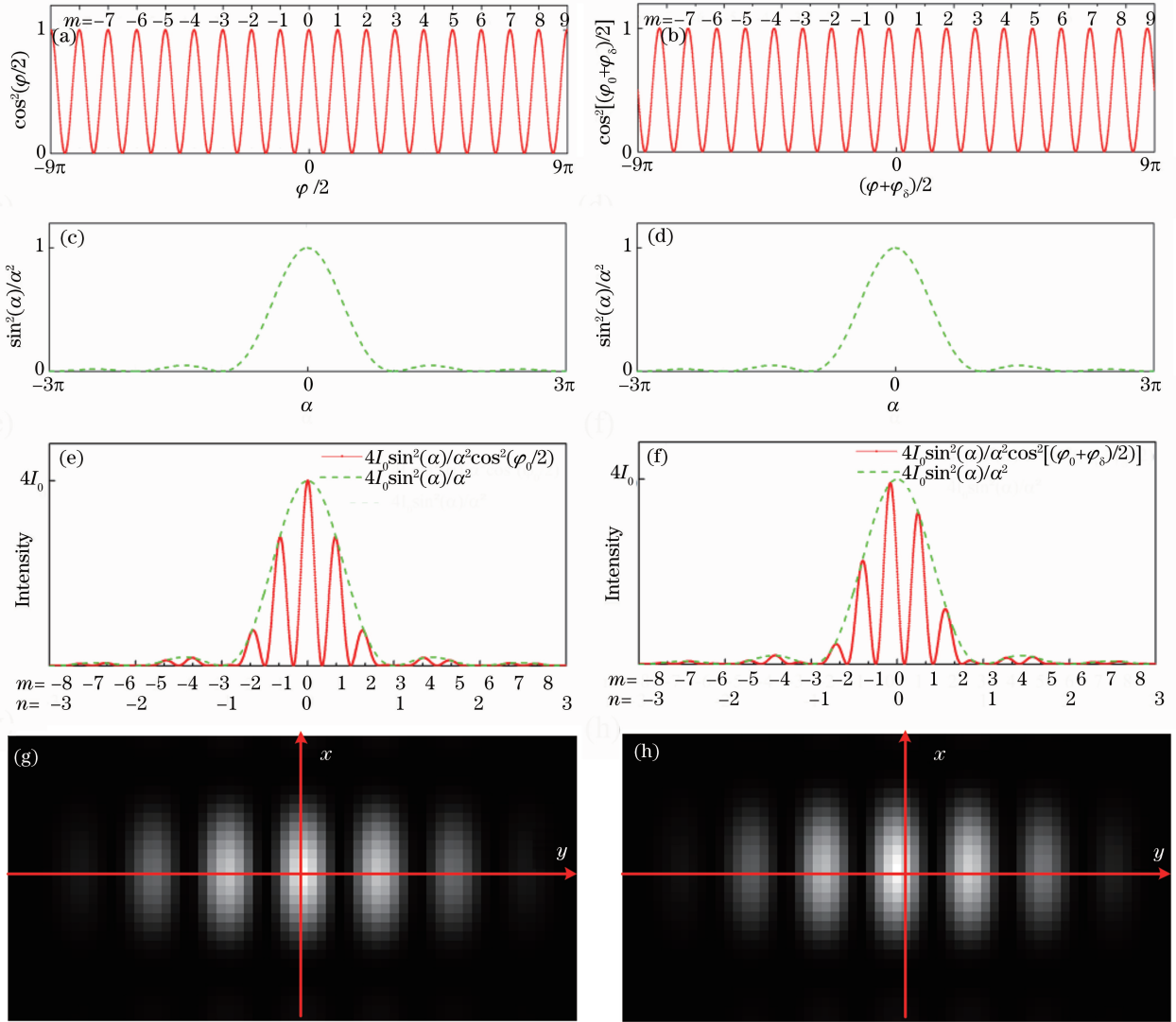


图 4 平移相差对双矩形孔衍射的影响。(a)等相位差双光束干涉因子；(b)不等相位差双光束干涉因子；(c)无平移相差时单矩形孔衍射因子；(d)有平移相差时单矩形孔衍射因子；(e)无平移相差时双矩形孔衍射一维强度分布；(f)有平移相差时双矩形孔衍射一维强度分布；(g)无平移相差时双矩形孔衍射二维强度分布；(h)有平移相差时双矩形孔衍射二维强度分布

Fig. 4 Effect of piston phase error on the diffraction pattern of double rectangle hole. (a) Double beam interference factor without piston phase error; (b) double beam interference factor with piston phase error; (c) single rectangle hole diffraction factor without piston phase error; (d) single rectangle hole diffraction factor with piston phase error; (e) one-dimensional diffraction pattern of double rectangle hole without piston phase error; (f) one-dimensional diffraction pattern of double rectangle hole with piston phase error; (g) two-dimensional diffraction pattern of double rectangle hole without piston phase error; (h) two-dimensional diffraction pattern of double rectangle hole with piston phase error

$$\begin{cases} y'_i = y_i - \delta_L \\ y'_j = y_j - \delta_L \end{cases} \quad (8)$$

假设 n'_i, n'_j 分别为实际两波长处光程差不足整数波长的部分, 根据(1)式和(2)式有:

$$n'_i - n'_j = n_i - n_j + \frac{\delta_L(T_i - T_j)}{T_i T_j} \quad (9)$$

一般情况下 $T_i \approx T_j$, 即 $n'_i - n'_j \approx n_i - n_j$, 根据(4)式计算得到的光程差值不变, 可见此时平移量的

存在对检测结果的影响可忽略。但如果两波长位置处峰值位于中心线异侧, (8)式中符号异号, 将导致检测误差, 可以通过波长位置的选取加以规避。

若标定中心线方向与实际中心线方向存在微小旋转角度 ϵ , 如图 5 所示, 标定的色散条纹中心线与 x 轴重合, 实际条纹中心线与 x' 轴重合。在 x - y 坐标系下, 波长 λ_i 处条纹峰值位置位于 $P(x_i, y_i)$ 点。需要确定此点在 x' - y' 坐标系下的实际位置 $(x'_i,$

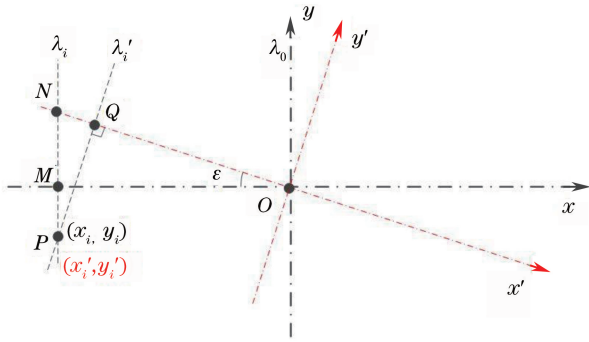


图 5 条纹中心线不同时同一峰值位置所对应波长与峰值偏移量的差异

Fig. 5 Difference between the wavelength and the peak offset corresponding to the same peak position when the center line of the fringe is different

y'_i), 以计算实际对应的波长与峰值偏移量。

由图 5 中的几何关系可得 Q 点在 $x'-y'$ 坐标下的横坐标 x'_i 以及对应的实际波长 λ'_i 与峰值偏移量 y'_i 分别为:

$$\begin{cases} x'_i = \frac{x_i}{\cos \epsilon} - (x_i \tan \epsilon + y_i) \cos \epsilon \\ \lambda'_i = \lambda_0 + \frac{x'_i}{x_i} (\lambda_i - \lambda_0) \\ y'_i = (y_i + x_i \tan \epsilon) \cos \epsilon \end{cases}, \quad (10)$$

式中 λ_0 为以上坐标系中心位置处的波长。则峰值偏移量 y'_i 对应 λ'_i 不足整个波长的部分 n'_i 为:

$$n'_i = \frac{y'_i}{T'_i}, \quad (11)$$

式中 T'_i 为最大偏移量, 类似地可得到在原标定坐标系下 λ_j 处所对应的实际波长位置 λ'_j 、峰值偏移量 y'_j 、不足整数波长部分光程差数 n'_j 以及最大偏移量 T'_j , 实际光程差公式改写为:

$$\delta = \frac{\lambda'_j \lambda'_i}{\lambda'_j - \lambda'_i} (\Delta_{ij} + n'_i - n'_j). \quad (12)$$

根据所提出的色散条纹中心线位置标定方法获得旋转误差参数, 代入(12)式进行平移误差的计算, 从而对标定误差的影响加以修正。

5 仿真与实验验证

5.1 仿真验证

由于前文已经说明色散条纹中心线位置平移量标定误差对计算结果的影响可忽略, 这里只考虑对中心线旋转误差的修正效果。与表 1 类似, 对于平移误差为 $-20 \mu\text{m}$ 以及旋转误差由 0° 增大到 1° 的情形, 未对中心线旋转误差进行修正以及利用所提修正方法进行修正之后, MPP 法计算误差分别如图 6

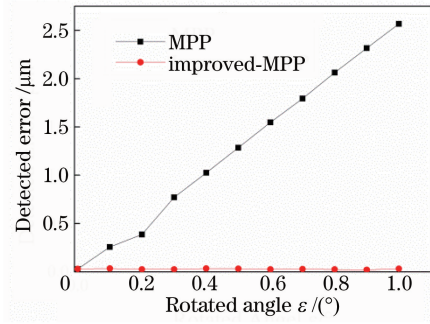


图 6 旋转角度增大时改进前后 MPP 法的检测误差

Fig. 6 Detection error before and after the improvement of the MPP method as the rotation angle calibration error increases

中黑色方块与红色圆点所示。

计算所用 $\lambda_i = 575 \text{ nm}$, $\lambda_j = 675 \text{ nm}$ 。仿真结果表明, 改进后的方法对于相同旋转角度的检测误差下降。特别是在旋转角度明显 ($\epsilon = 1^\circ$) 时, 改进前方法的检测误差达到 $2.6 \mu\text{m}$, 而改进后保持在 $0.02 \mu\text{m}$ 以内, 可满足粗共相过程对色散条纹共相误差检测精度的要求。

5.2 实验验证

在实验室搭建了拼接镜共焦共相实验平台, 采用激光光路进行准直, 完成光路搭建。再根据由粗到精、逐渐收敛的原则, 对拼接镜间倾斜误差与平移误差进行闭环检测与调整, 使其达到共相位目的, 然后用所提修正标定误差影响的方法进行实验验证。实验光路如图 7 所示。具体实验操作步骤如下:

1) 采用共焦相机对视场内拼接镜像点进行对准, 调整较大倾斜误差与平移误差, 再利用参考镜与拼接镜迈克尔逊干涉原理, 对拼接镜较小倾斜量进行调整, 完成拼接镜共焦;

2) 利用白光色散条纹传感光路对拼接镜间平移误差进行检测, 并通过运动平台(6 自由度电位移平台与压电陶瓷驱动器组合平台)对拼接镜位姿加以调整, 使平移误差逐渐收敛;

3) 通过干涉仪光路检测拼接镜间残余平移误差作为参考值或标准值;

4) 按照所提色散条纹中心位置标定方法对色散条纹图像的中心位置进行提取;

5) 采用上述标定误差对检测误差影响的修正方法对 MPP 法的检测结果加以修正。

为引入一定量的标定误差, 实验中将色散条纹图像探测器像素行采样方向作为标定色散方向, 将其安装在一个旋转装置上, 使其与棱栅色散方向产生一定的旋转角度, 真实值为 0.570° , 从而使标定色

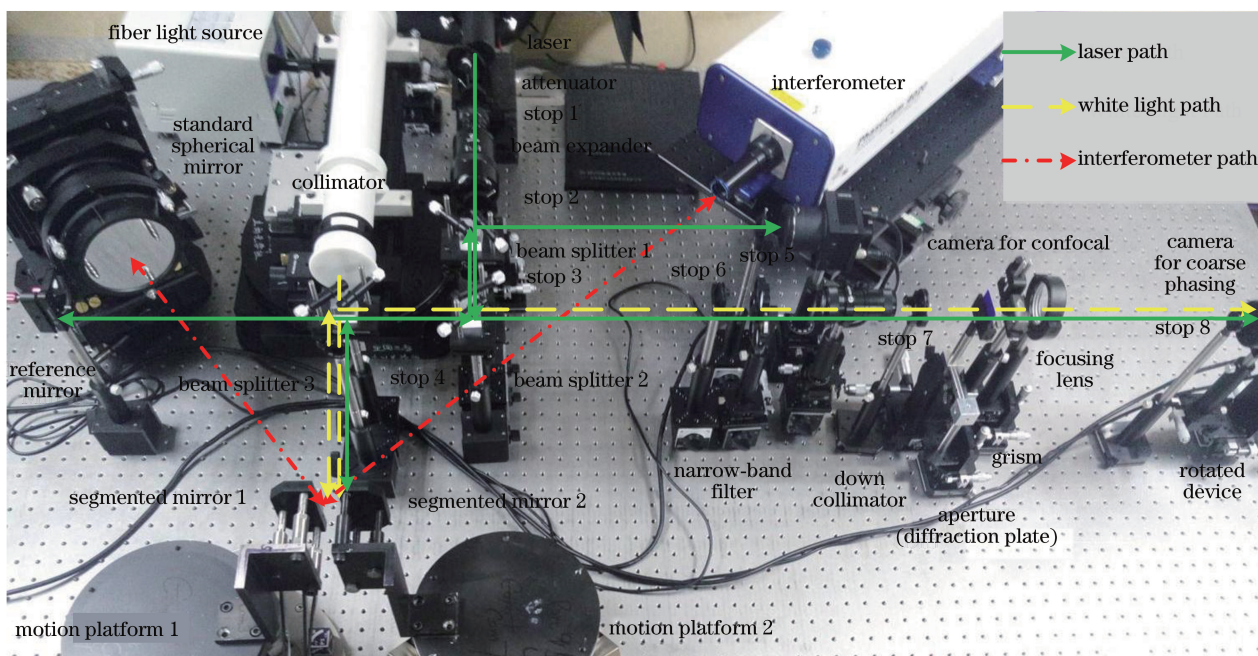


图 7 平移误差检测实验光路

Fig. 7 Experimental optical path for the detection of piston error

散条纹中心位置相对于真实色散条纹中心位置存在偏差。根据所提基于曲线拟合方法的色散条纹中心信号位置提取方法所计算得出的旋转角度为 0.562° ，比波长标定质心算法计算得出的旋转角度 1.014° 更为接近真实值。因此验证了该方法用于色散条纹中心位置提取时的准确性与有效性。

用干涉仪进行平移误差检测时，由于存在 2π 不确定性问题，只能对一个波长以内的平移误差进行直接检测。实验首先将子镜间平移误差所引入光程差调整到一个波长以内，此时直接利用干涉仪验证对标定误差影响修正前后 MPP 法的精度；在此基础上，利用运动平台精确引入某一已知平移误差（实验中为 $100\ \mu\text{m}$ ），继续验证对标定误差影响修正前后 MPP 法的精度。实验中采用的 $\lambda_i = 546\ \text{nm}$ ， $\lambda_j = 569\ \text{nm}$ 。两组实验对应的该波段色散条纹图像如图 8(a)与(b)所示，检测精度如表 2 所示。

从表 2 中的数据可以看出，所提方法能够有效提高 MPP 法的检测精度，并且在不同的平移误差范围内都有效。特别是在较小的平移误差下进行检

表 2 修正前后 MPP 法的检测精度

Table 2 Accuracy of the MPP method before

Piston error	and after correction		μm
	Detection error before correction	Detection error after correction	
0.055	0.167	0.027	
100.055	3.620	0.423	

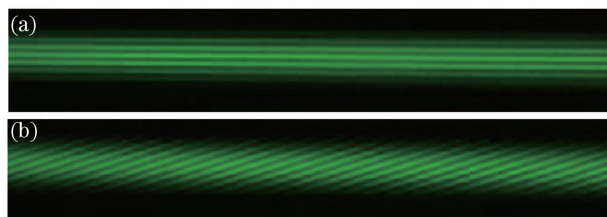


图 8 在目标波段内两组平移误差所对应的色散条纹图像。

(a) 0.055; (b) 100.055

Fig. 8 Dispersed fringe images corresponding to the two sets of piston error in the target wavelength range.

(a) 0.055; (b) 100.055

测时，能获得 $0.027\ \mu\text{m}$ 的精度；当平移误差较大时，虽然修正后精度降低，但相比修正之前仍有较大的提高。

6 结 论

本文通过分析色散条纹中心位置标定误差，对基于色散条纹图像的共相误差检测方法的影响效果进行了修正方法研究。重点分析了存在标定误差时 MPP 法检测精度下降的问题，并根据色散条纹图像产生原理，提出了一种基于曲线拟合的色散条纹中心位置标定方法。研究表明，该方法不仅适用于修正标定误差对 MPP 法的影响，还适用于其他基于色散条纹图像的共相误差检测方法对准确标定色散方向的需求，同时大大提高了 MPP 法检测平移误差时的抗干扰能力。

参 考 文 献

- [1] Gardner J P, Mather J C, Clampin M, *et al.* The James Webb Space Telescope[J]. Space Science Reviews, 2006, 123(4): 485-606.
- [2] Postman M, Argabright V, Arnold B, *et al.* Advanced technology large-aperture space telescope (ATLAST): a technology roadmap for the next decade[J]. Astrophysics, 2009, 430: 569.
- [3] Chanan G, Troy M. Strehl ratio and modulation transfer function for segmented mirror telescopes as functions of segment phase error[J]. Applied Optics, 1999, 38(31): 6642-6647.
- [4] Acton D S, Knight J S, Contos A, *et al.* Wavefront sensing and controls for the James Webb Space Telescope [J]. Proceeding of SPIE, 2012, 8442: 84422H.
- [5] Chanan G, Troy M, Ohara C. Phasing the primary mirror segments of the Keck telescopes: a comparison of different techniques[J]. Proceeding of SPIE, 2000, 4003: 188- 202.
- [6] Shi F, Chanan G, Ohara C, *et al.* Experimental verification of dispersed fringe sensing as a segment phasing technique using the Keck telescope[J]. Applied Optics, 2004, 43(23): 4474-4481.
- [7] Shi F, Redding D C, Bowers C W, *et al.* DCATT dispersed fringe sensor: modeling and experimenting with the transmissive phase plates[J]. Proceeding of SPIE, 2000, 4013: 757-762.
- [8] Shi F, Redding D C, Lowman A E, *et al.* Segmented mirror coarse phasing with a dispersed fringe sensor: experiment on NGST' s wavefront control testbed[J]. Proceeding of SPIE, 2003, 4850: 318-327.
- [9] Zhang Y, Zhang L, Liu G R, *et al.* Experimental study of segmented mirrors co-phase using dispersed fringe sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0212004.
张勇, 张靓, 刘根荣, 等. 基于色散条纹传感器的拼接镜面共相的实验研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0212004.
- [10] Meng Y H, Xu S Y, Xu B Q. Method of segmented mirror co-phasing based on dispersed fringe sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0911006.
孟玉凤, 徐抒岩, 许博谦. 基于色散条纹传感技术的拼接镜共相方法 [J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0911006.
- [11] Koechlin L, Lawson P R, Mourard D, *et al.* Dispersed fringe tracking with the multi- r_0 apertures of the Grand Interféromètre à 2 Télescopes [J]. Applied Optics, 1996, 35(16): 3002-3009.
- [12] vanDam M A, McLeod B A, Bouchez A H. Dispersed fringe sensor for the Giant Magellan Telescope[J]. Applied Optics, 2016, 55(3): 539-547.
- [13] Zhao W R, Cao G R. Active cophasing and aligning testbed with segmented mirrors[J]. Optics Express, 2011, 19(9): 8670-8683.
- [14] Yan Z J, Chen X Y, Yang P Q, *et al.* Co-phasing detecting method based on grating dispersed fringe for Fizeau Optical Interferometric Telescope[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(14): 149501.
颜召军, 陈欣扬, 杨朋千, 等. 基于光栅色散干涉条纹的非佐光干涉望远镜共相检测方法研究 [J]. 物理学报, 2015, 64(14): 149501.
- [15] Li Y, Wang S Q, Rao C H. Dispersed-fringe-accumulation-based left-subtract-right method for fine co-phasing of a dispersed fringe sensor [J]. Applied Optics, 2017, 56(15): 4267-4273.
- [16] Spechler J A, Hoppe D J, Sigrist N, *et al.* Advanced DFS: a dispersed fringe sensing algorithm insensitive to small calibration errors[J]. Proceeding of SPIE, 2010, 7731: 551-559.
- [17] Shi S X, Wang X E, Liu J S. Physical optics and applied optics [M]. 2nd Edition. Xi'an: Xidian University Press, 2008: 133-147.
石顺祥, 王学恩, 刘劲松. 物理光学与应用光学 [M]. 2 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008: 133-147.