

文章编号 1004-924X(2019)01-0026-08

拼接式反射镜共焦误差检测

郑 彬^{1,2,3*}, 陈永和^{1,2}, 傅雨田^{1,2}

(1. 中国科学院 上海技术物理研究所 红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:基于传统的夏克-哈特曼波前传感技术,针对实验室现阶段所拥有的合成孔径望远镜系统设计了一套共焦检测系统,用于对合成孔径系统的拼接主镜进行倾斜量误差检测。由于受实验平台振动和实验环境气流扰动等因素的影响,导致检测系统的夏克-哈特曼光斑质心阵列做无规则的抖动,检测系统难以实现高精度共焦。针对该问题提出采用连续帧频数据采样叠加滤波处理的方法来克服实验环境因素的影响;将采集的连续帧频数据逐帧处理,相互叠加,分析光斑质心分布规律,通过构建光斑分布图样最小外接矩形获取光斑质心位置,从而有效的提高了共焦检测系统的准确度。实验表明中心镜沿 x 与 y 方向的倾斜量误差数据的标准差分别从 0.029 7 与 0.009 2 降到了 6.0×10^{-5} 与 5.1614×10^{-4} 。最终光斑质心数据的稳定性得到了不止一个量级的提升,良好的克服了因实验环境因素导致检测系统精度损失的问题,同时也验证了共焦检测系统方案的可行性。

关键词:光学检测;共焦误差检测;拼接镜面;合成孔径系统

中图分类号:TH751;TP391.41 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20192701.0026

Co-focus error detection of segmented mirrors

ZHENG Bin^{1,2,3*}, CHEN Yong-he^{1,2}, FU Yu-tian^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;*

2. *Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: tank32012@sina.com*

Abstract: Based on the traditional Shack-Hartmann wavefront sensing technology, a co-focus error detection system has been designed for the synthetic aperture system, which is used to detect the tilt error of the segmented primary mirror of the synthetic aperture system. Because of the vibration of the experimental platform and the disturbance of the air flow in the experimental environment, the centroid of mass of the Shack-Hartmann spots array makes irregular jitter which results in the co-focus error detection system not meeting the high-accuracy requirement. In order to solve this problem, a

收稿日期:2018-09-08;修订日期:2018-10-08.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2015AA7015090, No. 2015AA7015097);国家自然科学基金资助项目(No. 11573049)

method of continuous frame rate data sampling and image processing is proposed to overcome the influence of environment. The collected video data is processed frame by frame and superimposed on each other to analyze the distribution law of the centroid of mass of the spots array. The minimum circumscribed rectangle of the spots map is constructed to obtain the position of the centroid of the spots, which greatly improves the detection accuracy of the co-focus error detection system. Experiments show that the standard deviations of the tilt error data along the X and Y directions of the central mirror were reduced from 0.029 7 and 0.009 2 to 6.0×10^{-5} and 5.1614×10^{-4} , respectively. Finally, the stability of the data of the spot centroid has been increased more than one magnitude, which greatly overcomes the problem of loss of precision of the detection system that is caused by environmental factors. In the meantime, the feasibility of the co-focus error detection system is verified.

Key words: optical detection; co-focus error detection; segmented mirrors; synthetic aperture system

1 引 言

望远镜系统的空间分辨力与系统的口径成正比^[1]。随着望远镜探测能力的提高,系统口径不断增大^[2],望远镜的主镜也从最初的单块式发展为子镜拼接式,因此精密检测并控制各分块子镜拼接成为完整的单一镜面是关键。对于子镜拼接需要同时对各分块子镜进行倾斜量误差和台阶误差检测,一般共相精度需要达到十分之一波长,通过主动光学技术来维持系统共相位的稳定。本文基于夏克-哈特曼波前传感技术^[3],设计了一套合成孔径共焦检测系统,用于对口径为 $\phi 616$ mm 的拼接主镜各分块子镜间的倾斜量误差进行检测。

子镜共焦主要是基于夏克-哈特曼波前传感原理。夏克-哈特曼波前传感器主要由微透镜阵列和 CCD 相机构成,含波前畸变的光束经微透镜阵列透射后,被划分成多个空间独立的子光束,子光束成像于微透镜阵列的焦平面上,使用 CCD 相机采集焦面的衍射光斑序列,传统夏克-哈特曼波前传感器通过计算子光束光斑质心的偏移量来复原待测波前的相位分布。夏克-哈特曼波前探测器结构简单、计算速度快、光能利用率高,适用于弱光探测,且复原波前的采样率满足光强闪烁、空间频率较高和非连续像差的检测需求,其各项技术已经成熟,并获得了广泛的应用。拼接子镜的倾斜误差导致其哈特曼图质心位置与标准参考平面(理想波面)相比,产生了偏移矢量;偏移矢量包含了各子镜的倾斜量。为了测量波前倾斜误差,需要精确地估算光斑质心位置相对于参考位

置的偏移矢量,因此,光斑质心位置的探测精度是影响波前倾斜误差检测系统精度的重要因素^[4]。目前,人们对提高哈特曼光斑质心探测精度的方法已经进行了深入的研究。减小质心探测噪声的方法一般归结为图像抑噪法、探测窗口法和阈值法^[5]。由于单独使用某一类方法并不能在最大程度上降低质心探测误差,因此,科研人员结合多种方法来提高质心探测精度,均获得了显著的效果^[4-8]。

但在实际过程中由于受实验平台振动以及环境气流扰动等因素的影响,聚焦光斑阵列会做不规则的抖动,导致共焦检测系统的检测精度难以进一步提高,影响检测系统的准确性。针对该问题,本文提出连续帧频数据采样叠加滤波处理的方法,将连续帧频数据逐帧提取,相互叠加,分析光斑质心的分布规律,通过构建每个重叠光斑分布图样的最小外接矩形以获取光斑图样的质心位置,从而提高光斑质心的提取精度,解决检测系统因实验环境因素而导致光斑质心做无规律抖动的问题。

2 基本原理

2.1 光学检测系统

图 1 为子镜拼接共焦检测系统示意图,共焦检测系统固定在拼接主镜的焦点处。对于子镜共焦,检测系统的关键元件是微透镜阵列,采用 THORLABS 公司型号为 MLA300-14AR 的透镜阵列,如图 2 所示,其详细参数如表 1 所示。图 3 所示为实验室现阶段所拥有的拼接主镜,由一块中心镜和 8 块边缘子镜构成。中心镜固

定,其余各分块子镜背后均有一套微位移调整机构。

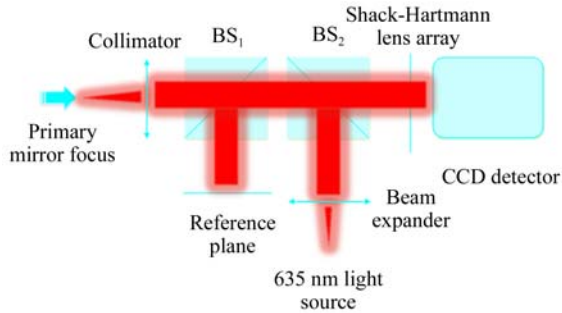


图 1 共焦检测系统光路图

Fig. 1 Layout of co-focus error optical detection system

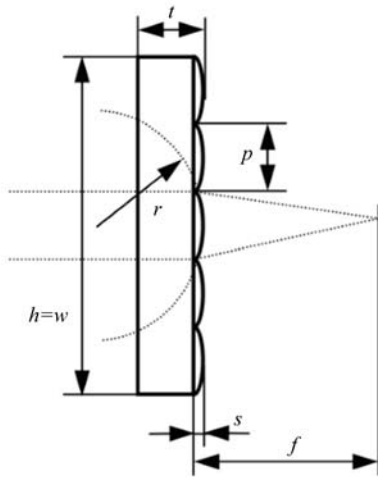


图 2 哈特曼微透镜阵列

Fig. 2 Hartmann lens array

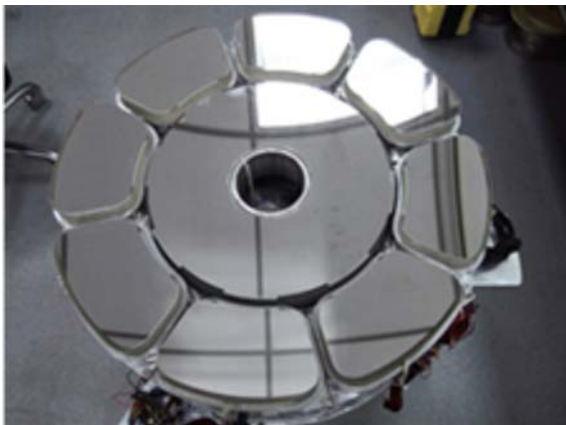


图 3 拼接主镜

Fig. 3 Photo of segmented primary mirror

表 1 透镜阵列的详细参数

Tab. 1 Specifications of lens array

Parameter	MLA300-14AR
Substrate material	Fused silica
Wavelength range	From DUV to IR
Array size and type	10 nm×10 mm, Square grid
Lens type	Square, Refractive, Plano-convex
Focal length	18.6 mm
AR-coating	Yes, Reflectivity<1% , Within 400—900 nm
h, w	10 mm
t	1.20 mm
P	300 μm
s	1.31 μm
r	8.6 mm

2.2 共焦检测原理^[9]

共焦检测是基于夏克-哈特曼波前传感技术,利用哈特曼镜阵列各分块透镜倾斜波前光斑质心位置的偏移矢量对各分块子镜进行倾斜量误差测量。调整各子镜,使得各子镜对应的光斑质心等于参考点的倾斜矢量,从而确定各子镜共焦。

夏克-哈特曼波前传感器原理如图 4 所示。它主要由按一定规律排列的微透镜阵列与探测器元件组成。设位置为 (i, j) 的子透镜对应的光斑在 x, y 方向的位移分别为 $\Delta x, \Delta y$ 。设子透镜与观察屏之间的距离为 f , 则子透镜上的波前平均斜率 G_x, G_y 为:

$$G_x = \Delta x / f, \quad (1)$$

$$G_y = \Delta y / f. \quad (2)$$

求出畸变波前上被各阵列透镜分割的子透镜

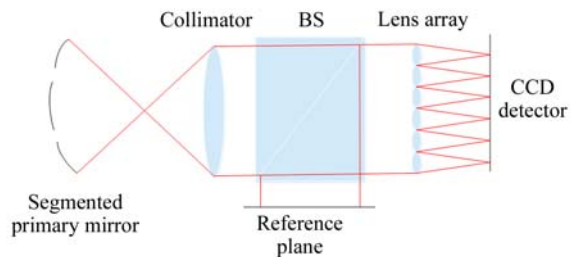


图 4 共焦检测原理图

Fig. 4 Principle of co-focus error detection

范围内波前的平均斜率,即可求得全孔径波前的光程差或位相分布。

2.3 连续帧频数据采样叠加滤波处理方法

实验过程中由于受实验平台振动以及实验环境气流扰动等因素的干扰,哈特曼聚焦光斑阵列会做无规则的抖动;而光斑阵列的抖动大多是随机变量随时间变化的过程,瞬时值不能被确定,不能用解析函数的方法描述,只能应用概率和统计学的方法描述,例如均值、方差、噪声谱密度等。

为了克服实验平台抖动以及实验环境气流扰动等因素的干扰,除了进行硬件处理,最直接的手段就是采用连续帧频数据采样叠加滤波处理的方法。随机抖动的光斑质心分布图样满足一定的概率分布,假设每帧光斑质心图样做无规则抖动是相互独立的随机过程,具有不相关性,那么每个光斑因抖动引起的总的均方噪声为各帧噪声的均方和。

设 S_i 为连续帧频采样第 i 帧的光斑图样的信号值,则连续采集 m 帧的光斑信号平均值为:

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^m S_i}{m}. \quad (3)$$

设每帧图样光斑的噪声为 $N_i (i=1, 2, \dots, m)$,由于每帧图样中光斑的噪声信号是相互独立,满足均值为 0,均方差为 σ^2 的高斯噪声,且 $E\{N_i N_j\}=0$,因此相互叠加后平均信号的噪声为:

$$\bar{N} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m N_i^2}{m}}. \quad (4)$$

在连续帧频数据采样叠加滤波处理中,信号是线性相加,取算术和;对噪声而言则按统计学规律增长,取平方和之根。设光斑图样的信号为 S ,噪声为 N ,那么 m 帧图像叠加之后的信噪比为:

$$\text{SNR} = \left\{ \frac{S}{N} \right\} = \frac{S_1 + S_2 + \dots + S_m}{\sqrt{N_1^2 + N_2^2 + \dots + N_m^2}} = \frac{m\bar{S}}{\sqrt{m}\bar{N}} = \sqrt{m} \frac{\bar{S}}{\bar{N}}. \quad (5)$$

由此可见,与单帧数据采样的方法相比,连续帧频数据采样叠加滤波处理方法的信噪比在理论上提高 $m^{1/2}$ 倍,随着连续帧频数据采样帧数 m 的增大,信噪比也随之增加。因此,可以预见采用连

续帧频数据采样叠加滤波处理的方法,可极大地滤除由于实验平台振动以及实验环境气流扰动等因素对光斑质心阵列的影响。

3 实验平台与数据处理

3.1 实验平台

目前,实验室只有两台 PI 六足控制机构具有足够高的调整精度和承重能力来调整分块子镜,因此实验过程优先对该相邻两块子镜进行调整实验,实验拼接主镜如图 5 所示。图中,最上面一块子镜为子镜 1。图 6 为拼接面共焦检测得到的光斑阵列图样。图 7 所示为高面形精度平面反射镜返回的参考光经哈特曼微透镜阵列以后在焦平面探测器上形成的参考光斑序列图样。



图 5 实验中的拼接主镜

Fig. 5 Segmented primary mirror in current experiment

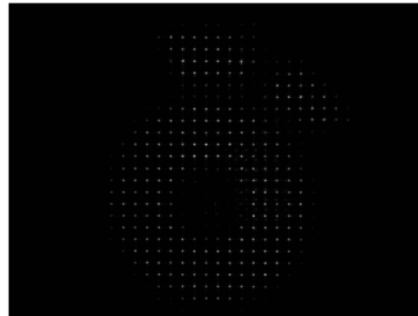


图 6 拼接主镜的光斑阵列图像

Fig. 6 Image of spot array of segmented primary mirror

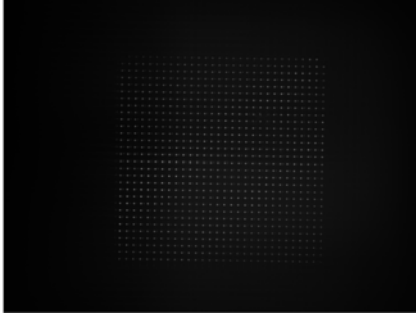


图 7 参考光斑阵列图像

Fig. 7 Image of reference spot array

3.2 数据处理

对于获取的图像数据需要进行质心提取和波前斜率解算,基本共焦检测流程如图 8 所示。光束经过微透镜阵列后,在探测器上所形成的光斑是由若干个像素组成的。在波前解算重构中,高精度的质心提取是保证波前检测精度的一大关键。

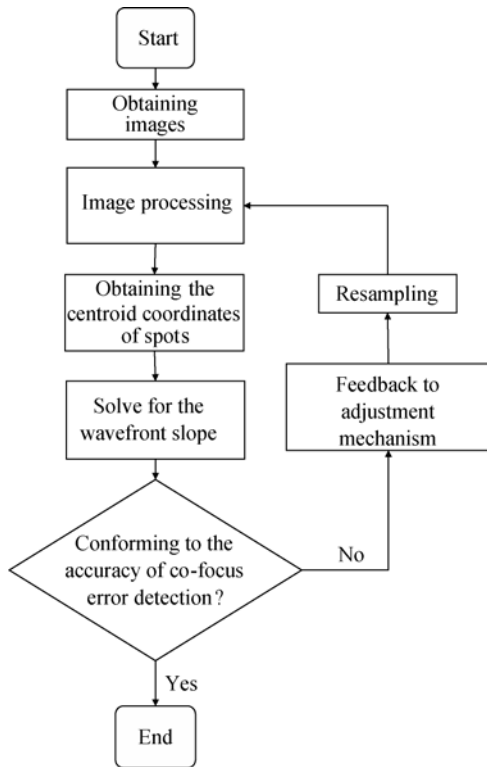


图 8 共焦检测流程图

Fig. 8 Flow chat of co-focus error detection

对探测器输出的光斑图样进行预处理,首先读取阈值分割后的二值化图样数据并用矩阵来储存,然后将二值化图样数据转为标记矩阵,标记矩阵包含标记了二值化图样中每个连通区域的类别

标签。通过对原灰度图像数据矩阵和二值化图样的标记矩阵点乘,可以提取图样中感兴趣区域的属性。利用光斑质心探测式(6)和式(7),根据标记的连通区域内像素灰度去分配权重,求出光斑的中心坐标。

$$\bar{x} = \frac{\sum xI_{x,y}}{\sum I_{x,y}}, \quad (6)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum yI_{x,y}}{\sum I_{x,y}}. \quad (7)$$

根据上述数据处理流程以及光斑质心初步提取方法,对子镜 1 的图样数据进行处理,得到的测量结果如表 2 所示。由表 2 可知,此时子镜 1 相对中心镜沿 X,Y 方向的倾斜量分别为 0.0374° , -0.4163° ,波相差为^[10]:

$$\Delta\tau = -\epsilon_z \frac{x^2 + y^2}{2R^2} - \epsilon_x \frac{x}{R} - \epsilon_y \frac{y}{R}, \quad (8)$$

其中: $\epsilon_x = \frac{\alpha_x R}{\sqrt{1 - (\frac{x}{R})^2}}$, $\epsilon_y = \frac{\alpha_y R}{\sqrt{1 - (\frac{y}{R})^2}}$, α_x 为沿

X 方向的倾斜角度, α_y 为沿 Y 方向的倾斜角度, $R=1975 \text{ mm}$ 。由此分别算出此时子镜 1 内外边缘处由于倾斜量误差而导致的波像差,得到: $\Delta\tau_{(x=0, y=195)} = 1423.8 \mu\text{m}$, $\Delta\tau_{(x=0, y=308)} = 2265.6 \mu\text{m}$ 。

很显然,子镜 1 和中心镜存在较大的倾斜量误差,共焦程度比较低,为了得到高度共焦,需要根据测试所得到的倾斜量误差进行调整。但是从开始实验测试以来,由于实验环境不理想,包括实验平台振动和环境气流扰动的影响,未得到理想的共焦检测结果。

表 3 罗列了 5 次单帧采样数据处理所得的中心镜波前平均斜率。表 4 罗列了 5 次连续帧频数据采样实验图样解算所得数据,每次连续帧频数据采样的帧频数据大于 30 帧。对每段连续帧频数据进行帧频提取,相互叠加获得光斑质心分布图案,然后构建每个重叠光斑图样的最小外接矩形获取光斑质心。

表 5 数据为重采样实验获得的一组光斑图样解算所得结果。据表 5 可得,此时边缘子镜 1 相对于中心镜沿 X,Y 方向的倾斜角度分别为 -0.0061° 与 0.0065° ,根据公式(8)可以重新计算此时子镜 1 内外边缘处的波像差分别为: $\Delta\tau'_{(x=0, y=195)} = 22.2 \mu\text{m}$, $\Delta\tau'_{(x=0, y=308)} = 35.4 \mu\text{m}$ 。

表 2 子镜 1 的倾斜误差
Tab. 2 Tilt errors of sub-mirror 1 (°)

Data	The inclination along the X direction	The inclination along the Y direction
Central mirror	-0.353 4	-0.121 2
Sub-mirror 1	-0.316 0	-0.537 5
Difference value	0.037 4	-0.416 3

表 3 五次共焦检测中心镜数据
Tab. 3 Five times co-focus error detection data of central mirror (°)

Data set	The inclination of the central mirror along the X direction	The inclination of the central mirror along the Y direction
1	-0.279 0	-0.198 2
2	-0.301 7	-0.177 1
3	-0.294 6	-0.186 6
4	-0.217 6	-0.171 0
5	-0.279 3	-0.182 6
Standard deviation	0.029 7	0.009 2

表 4 五次连续帧频共焦检测中心镜数据
Tab. 4 Five times video frequency co-focus error detection data of central mirror (°)

Data set	The inclination of the central mirror along the X direction	The inclination of the central mirror along the Y direction
1	0.128 2	-0.046 4
2	0.129 0	-0.047 3
3	0.128 4	-0.046 6
4	0.128 0	-0.045 7
5	0.127 7	-0.046 7
Standard deviation	6.0×10^{-5}	$5.161 4 \times 10^{-4}$

表 5 子镜 1 的重采样倾斜误差
Tab. 5 Resampling tilt errors of sub-mirror 1 (°)

Data	The inclination along the X direction	The inclination along the Y direction
Central mirror	0.124 4	0.255 2
Sub-mirror 1	0.118 3	0.261 7
Difference value	-0.006 1	0.006 5

4 分析与讨论

由表 2 可以看出,分块子镜 1 和中心镜的共

焦程度比较差,存在较大的倾斜误差。表 3 中,中心镜沿 X,Y 方向的倾斜量数据的标准差分别为 0.029 7,0.009 2;观察数据分布规律也可知,此时解算的波前斜率数据分布的离散程度比较大;

因此,光斑的质心提取精度受环境因素的影响较大。

为了解决上述光斑质心图样随环境因素扰动做无规则抖动的问题,这里提出了采用连续帧频数据采样滤波处理的方案。根据该方案,在一段时间间隔内,依次进行连续帧频数据采集,将连续帧频数据逐帧提取,相互叠加,最终分析每个叠加光斑的质心分布规律。根据每个光斑的质心分布规律,通过构建每个重叠光斑分布图样的最小外接矩形来获取光斑的质心位置,得到表 4 和表 5 的重采样数据。表 4 中,中心镜沿 X, Y 方向倾斜量误差数据的标准差分别为 6.0×10^{-5} 和 5.1614×10^{-4} ,与单帧采样相比,得到了不止一个量级的提升,数据的离散性明显比单帧采样测量时的小;观察表 4 中的数据分布可以看出,光斑质心提取精度得到了不止一个量级的提升。表 5 中的数据为改进采样方法共焦检测调整后的一组重采样图样解算结果,两分块子镜依然存在倾斜量误差,但较初始情形时已经得到较大幅度的校正;对应子镜 1 内外边缘处的波像差也从 $2265.6 \mu\text{m}$ 和 $1423.8 \mu\text{m}$ 降到了 $35.4 \mu\text{m}$ 和 $22.2 \mu\text{m}$,极大程度地提高了主镜拼接的共焦程度。

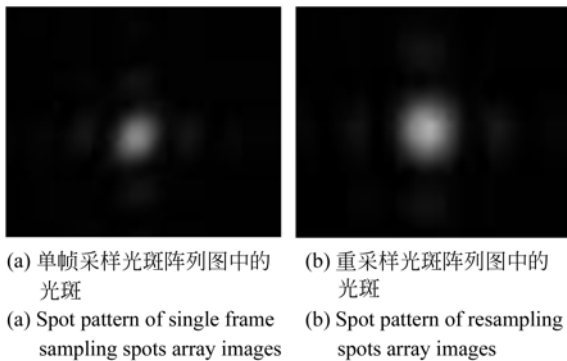


图 9 光斑图像
Fig. 9 Spot images

由图 9 可以直观地看出在改进采样处理方法前后每个光斑图样的变化。理想情况下,夏克-哈特曼微透镜阵列所对应的每个光斑应该是理想的圆斑,但是由于实验平台的振动以及实验环境气

流的扰动,采样光斑阵列中的光斑也在做无规则的抖动,每个光斑模样都发生了较大的畸变,阵列图中的部分光斑均为扁椭圆形,如图 9(a)所示,严重影响光斑质心的提取精度。为了克服该实验环境扰动因素,在加固实验平台的基础上,采用连续帧频数据采样叠加滤波处理,处理后光斑阵列中的每个光斑图样如图 9(b)所示,与理论的圆形光斑比较符合,极大地提高了光斑质心的采样精度。

由于实验所采用的拼接主镜口径较大,各分块子镜都具有一定的厚度和质量,各分块子镜支撑调整系统所承载的载荷较大,因此整个合成孔径系统对实验平台的振动和环境气流扰动等因素极具敏感,导致共焦检测系统的检测精度受环境因素的影响较大。根据上述分析可知,本文提出的共焦检测光斑质心图样连续帧频数据采样叠加滤波处理方法有效地提高了夏克-哈特曼波前检测光斑质心的提取精度。

5 结 论

本文基于传统的夏克-哈特曼波前传感技术设计了一套拼接式反射镜共焦误差检测光学系统,对合成孔径系统的拼接式主镜进行倾斜量误差检测。实验过程中,由于口径较大系统极易受环境因素的影响,导致夏克-哈特曼光斑图样质心阵列随实验平台振动以及实验环境气流扰动等因素做无规则抖动,光斑质心图样连续帧频数据采样叠加滤波处理的方法有效地解决了该问题。实验结果显示,中心镜沿 x 与 y 方向的倾斜量误差数据的标准差分别从 0.0297 与 0.0092 降到了 6.0×10^{-5} 与 5.1614×10^{-4} ,光斑质心数据的稳定性得到了显著提升;同时数据处理分析计算可得,经重新调校以后,子镜 1 内外边缘处的波像差也从 $1423.8 \mu\text{m}$ 与 $2265.6 \mu\text{m}$ 降低至 $22.2 \mu\text{m}$ 和 $35.4 \mu\text{m}$,克服了因环境因素导致光斑质心做无规则抖动致使光学检测系统精度损失的问题,验证了共焦检测方案的可行性。在下一步工作中,将结合轻量化的拼接主镜开展高精度的质心提取工作,进一步完善拼接镜系统的共焦和共相误差检测实验。

参考文献:

- [1] 安其昌.三十米望远镜三镜集成检测关键技术研究[D].北京:中国科学院博士论文,2018.
AN Q CH. *Thirty Meter Telescope Tertiary Mirror Alignment and Metrology* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [2] 谭玉凤.地基大口径望远镜结构设计以及主镜热控研究[D].北京:中国科学院博士论文,2018.
TAN Y F. *Research on Ground-based Large-aperture Telescope Mount and Thermal Control for Primary Mirror* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [3] SHACK R V, PLATT B C. Production and use of a lenticular hartmann screen [J]. *Journal of Optical Society of America A*, 1971,61(5):656-661.
- [4] 李臣亮,胡新奇.计算扩展目标夏克-哈特曼传感器子图像偏移量的相关函数质心法研究[J]. *光学学报*,2017,37(9):0928003.
LI CH L, HU X Q. Study on centroid-of-correlation-function approach for estimating the sub-image shifts in the extended scene Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017,37(9):0928003. (in Chinese)
- [5] 李晶,巩岩,呼新荣,等.哈特曼-夏克波前传感器的高精度质心探测方法[J]. *中国激光*,2014,41(3):0316002.
LI J, GONG Y, HU X R, *et al.*. A high-precision centroid detecting method for Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014,41(3):0316002. (in Chinese)
- [6] 钮赛赛,沈建新,梁春,等.人眼像差探测哈特曼波前传感器的质心优化[J]. *光学精密工程*,2011,19(12):3016-3024.
NIU S S, SHEN J X, LIANG CH, *et al.*. Centroid optimizational of Hartmann-Shack wave-front sensor human eye aberration detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12):3016-3024. (in Chinese)
- [7] 夏爱利,马彩文.基于图像处理技术的光斑质心高精度测量[J]. *光电子·激光*,2011,22(10):1542-1545.
XIA A L, MA C W. Measurement of focal spot centroid based on image processing [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, 22(10):1542-1545. (in Chinese)
- [8] 梁春,廖文和,沈建新,等. Hartmann-Shack 波前传感器的自适应质心探测方法[J]. *中国激光*,2009,36(2):430-434.
LIANG CH, LIAO W H, SHEN J X, *et al.*. An adaptive detecting centroid method for Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(2): 430-434. (in Chinese)
- [9] RAMIRO C M, JESUS G M, MARTHA R A, *et al.*. Shack-Hartmann wavefront sensor using a Raspberry Pi embedded system [J]. *SPIE*, 2017, 10231: 102311X-1-6.
- [10] 乔玉晶.非球面拼接测量中偏置误差作用机理与拼接方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008:21-25.
QIAO Y J. *Study on the Effect Mechanism of Structure Bias Error and the Stitching Interferometric Measurement of Aspheric Surfaces* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008:21-25. (in Chinese)

作者简介:



郑彬(1990—),男,福建永泰人,博士研究生,2014年于福建师范大学光电与信息工程学院(光仪系)获得学士学位,主要从事光学系统设计以及检测工作。E-mail: tank32012@sina.com



傅雨田(1967—),男,浙江杭州人,研究员,博士生导师,1990年于浙江大学获得学士学位,1996年、1999年于中科院上海技术物理研究所分别获得硕士和博士学位,主要从事空间红外遥感仪器方面的研究。Email: yutianfu@mail.sitp.ac.cn