

新型离轴反射变焦距光学系统的多视场检测方法

周继德 常军 牛亚军 谢桂娟 王希

Novel multiple field of view detection method for the off-axis reflection zoom optical system

Zhou Ji-De Chang Jun Niu Ya-Jun Xie Gui-Juan Wang Xi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 084208 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.084208

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.084208>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微生物远红外波段复折射率测定及模型构建

[Determination and model construction of microbes' complex refractive index in far infrared band](#)

物理学报.2013, 62(9): 094218 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.094218>

反射式棱栅对展宽器用于啁啾脉冲放大激光的研究

[A reflective grism pair stretcher for chirped pulse amplification](#)

物理学报.2013, 62(9): 094202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.094202>

基于光线光学的非线性自聚焦现象的仿真分析

[Simulation and analysis of nonlinear self-focusing phenomenon based on ray-tracing](#)

物理学报.2013, 62(4): 044202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.044202>

光学频率梳空间光谱分辨精度研究

[Spatial dispersion of pulse shaping system with high resolution based on the frequency comb](#)

物理学报.2012, 61(18): 184201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.184201>

圆锥边界附近激光空泡溃灭行为的研究

[Investigation of the collapse of laser-induced bubble near a cone boundary](#)

物理学报.2012, 61(17): 174210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.174210>

新型离轴反射变焦距光学系统的多视场检测方法*

周继德 常军† 牛亚军 谢桂娟 王希

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

(2015年9月27日收到; 2016年1月1日收到修改稿)

基于对离轴反射变焦距光学系统进行计算机辅助装调研究, 需要检测离轴反射变焦距系统各个视场的波像差, 除零度视场外, 获得包括其他视场的波像差有助于提高计算机辅助装调的准确性, 但是目前已有的波像差检测方法往往只能获得系统零度视场的波像差. 本文针对这个难题提出了一种检测离轴反射变焦距光学系统各个视场波像差的方法, 并应用于离轴三反变焦距光学系统的各视场波像差仿真检测. 该方法在传统自准直干涉法的基础上进行改进, 关键在于采用变形镜代替扫描的平面镜, 并采用夏克-哈特曼波前传感器代替干涉仪, 配合精确标定的激光器光源阵列, 可以实现对离轴三反变焦距光学系统的多视场波像差同时检测. 由理论分析和仿真模拟得出, 该系统在视场 $(0^\circ, 3^\circ)$, $(0^\circ, 4.2^\circ)$, $(0^\circ, 5.5^\circ)$, $(0^\circ, 7^\circ)$, $(0^\circ, 9.8^\circ)$, $(0^\circ, 14^\circ)$ 处经过变形镜补偿后的剩余波像差的 RMS 值分别为 0.00039λ , 0.00075λ , 0.0024λ , 0.00017λ , 0.00053λ , 0.0057λ , 分析仿真结果表明此检测方案是可行的, 且适用于离轴反射变焦距系统的计算机辅助装调技术的研究.

关键词: 光学系统波像差检测, 计算机辅助装调, 夏克-哈特曼波前传感器, 离轴反射变焦距系统

PACS: 42.87.-d, 42.15.Dp, 42.15.-i, 42.40.My

DOI: 10.7498/aps.65.084208

1 引言

反射式光学系统具有无色差、成像谱段宽、成像口径大等特点, 可以满足空间对地遥感、空间摄影等领域的需求, 因而越来越受到人们的关注^[1]. 反射式光学系统分为同轴和离轴两种结构形式, 离轴反射式光学系统可以提高光能利用率并获得很大的观测视场. 但是, 离轴反射式光学系统没有参考轴, 使得后期系统的装调和检测难度很大. 传统的装调检测方法是基于自准直干涉法对离轴反射式光学系统进行系统波前误差检测, 比如杨晓飞等^[2]和巩盾等^[3]利用 Zernike 系数对离轴反射系统的计算机辅助装调的研究是采用自准直干涉法来检测系统的波前误差. 然而, 当对离轴反射变焦距光学系统进行装调时, 该装调方法就不再适用了. 因为大部分离轴反射变焦距光学系统在不同焦距处覆盖了不同的视场, 为了对系统在不同焦距状态下进行系统检测装调研究, 需要对变焦距系统的

不同视场下波前误差进行检测, 而离轴反射变焦距光学系统往往是偏视场设计且不包含零度视场的, 这给基于传统自准直干涉法的系统检测带来了难题. 自准直干涉法在检测变焦系统不同视场的波像差时需要移动干涉仪, 这样就给检测带来其他不可控影响, 导致检测时间长、检测精度下降. 近年来, 国内外科学家均提出采用夏克-哈特曼波前传感器来检测波前误差, 比如法国 Imagine Optics 公司专门开发用于光学系统装调的像差监测系统的夏克-哈特曼传感器, 目前已经研制出用于一般光学装调的 HASO32 (32×32 微透镜阵列, 波前探测精度为 $\lambda/100$ RMS, 最高工作频率为 50 Hz) 和用于高精度光学检测的 HASO3-128 (128×128 微透镜阵列, 波前探测精度为 $\lambda/100$ RMS, 最高工作频率为 7.5 Hz); 还有 Novak 等^[4]也利用夏克-哈特曼波前传感器对光学系统波前误差进行检测研究; 为了提高夏克-哈特曼传感器动态测量范围, Saita 等^[5]提出运用全息和模式匹配技术来提高其动态

* 国家自然科学基金 (批准号: 61178041) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: bitchang@bit.edu.cn

测量范围的方法, 他们通过光学实验验证了该方法的可行性, 而且这一研究也证明了夏克-哈特曼波前传感器具有同时测量多视场波前误差的能力. 国内, Cheng 等^[6]通过研究更好的波前控制算法使夏克-哈特曼波前传感器检测波前误差更加精确; 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所张金平等^[7]运用夏克-哈特曼波前传感器来检测大口径非球面面形误差, 将其测量的结果与传统干涉仪进行了对比, 对比结果表明夏克-哈特曼传感器具有测量精度高、耗时短等优点; 北京理工大学孙倩倩和胡新奇^[8]运用波前传感器测量同轴三反线阵空间相机宽视场的波前误差, 提出了测量该类系统多视场的波前误差的新方法. 以上国内外研究结果均表明夏克-哈特曼波前传感器探测波前误差方法是可行而且精确的.

受已有工作启发, 针对离轴反射变焦距光学系统的自身特性, 本文提出了检测系统各个视场波像差的方法. 在此方法中, 主要技术是采用变形镜代替扫描平面镜, 消除了平面镜的机械扫描机制, 同时采用夏克-哈特曼波前传感器取代干涉仪作为波前检测装置, 解决了干涉仪在检测离轴视场时存在的损失部分波前信息的问题, 配合经过位置标定的

激光器阵列, 最终实现离轴反射变焦距光学系统的多视场波像差同时检测.

2 离轴反射变焦距光学系统的检测原理

2.1 离轴反射变焦距光学系统多视场波像差检测方法

本文提出的检测方法是在自准直干涉法基础上进行改进得到的, 具有调试简单、检测精度高等优点, 最后待检测离轴反射变焦距光学系统的多视场的波前误差可以通过夏克-哈特曼波前传感器获得. 检测方法示意图如图1所示, 经过位置标定的阵列激光器能出射特定角度的激光, 而且每次测量只有某个特定的激光器被点亮, 其他激光器将关闭, 用来模拟某一特定视场的光源. 特定方向发射的激光经过准直扩束系统后, 确保充满夏克-哈特曼波前传感器的微透镜阵列, 并从待测的离轴三反变焦距光学系统像面的位置进入光学系统, 光线经过光学系统后在变形镜处按原路返回, 返回的光线再通过光学系统进入夏克-哈特曼波前传感器, 完成各视场的波前误差的探测.

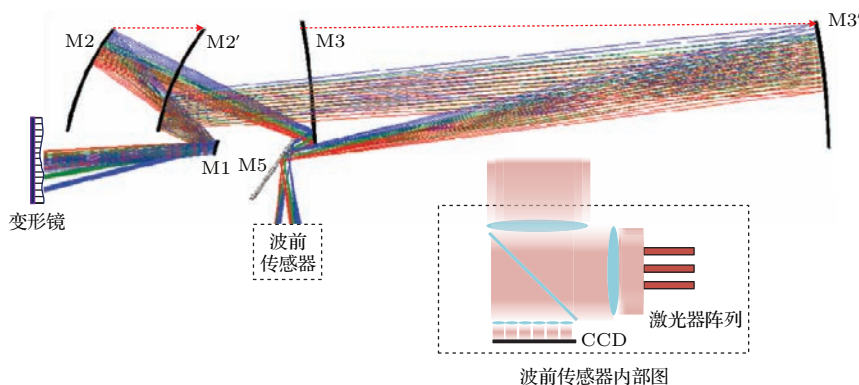


图1 (网刊彩色) 离轴反射变焦距光学系统检测装置原理图

Fig. 1. (color online) Principle diagram of detection device for off-axis reflective zoom system.

2.2 变形镜补偿原理

近年来, 变形镜^[9]作为自适应光学系统一个核心元件, 其有效口径能够达到数百毫米, 矫正误差能达到20 nm RMS, 因此有能力补偿离轴反射变焦距光学系统不同视场下的波像差. 引入变形镜校正的好处: 1) 可以避免使用平面反射镜扫描机制; 2) 可以补偿系统中部分像差, 确保最小的波像

差进入夏克-哈特曼波前探测器, 从而提高探测范围和精度. 变形镜的工作原理如图2所示, 以一定角度入射的光线经变形镜反射后按原路返回. 由于Zernike多项式在圆域上具有正交性, 且其第2项和第3项能够控制表面的倾斜, 因此通过Zernike多项式控制变形镜的面型, 可以使其在不改变位置的情况下能够代替不同视场下的倾斜平面镜. Zernike多项式的表达形式如(1)式所示, 其前15项

表达的含义如表 1 所示.

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2r^2}} + \sum_{j=1}^n C_{j+1} Z_j, \quad (1)$$

表 1 前 4 阶 Zernike 多项式与系统像差对应关系

Table 1. The relationship between the first four order Zernike polynomials and the aberration of optical system.

项	Zernike 表达式	系统像差
1	1	Piston (constant)
2	$R \cos \theta$	Distortion-Tilt (x -axis)
3	$R \sin \theta$	Distortion-Tilt (y -axis)
4	$R^2 \cos(2\theta)$	Astigmatism, primary (axis at 0° or 90°)
5	$2R^2 - 1$	Defocus-Field curvature
6	$R^2 \sin(2\theta)$	Astigmatism, primary (axis at $\pm 45^\circ$)
7	$R^3 \cos(3\theta)$	Trefoil, primary (x -axis)
8	$(3R^3 - 2R) \cos \theta$	Coma, primary (x -axis)
9	$3R^3 - 2R \sin \theta$	Coma, primary (y -axis)
10	$R^3 \sin(3\theta)$	Trefoil, primary (y -axis)
11	$R^4 \cos(4\theta)$	Tetrafoil, primary (x -axis)
12	$(4R^4 - 3R^2) \cos(2\theta)$	Astigmatism, secondary (axis at 0° or 90°)
13	$6R^4 - 6R^2$	Spherical aberration, primary
14	$(4R^4 - 3R^2) \sin(2\theta)$	Astigmatism, secondary (axis at $\pm 45^\circ$)
15	$R^4 \sin(4\theta)$	Tetrafoil, primary (y -axis)

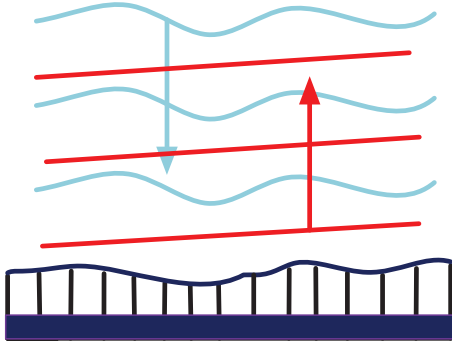


图 2 (网刊彩色) 变形镜校正波前原理图

Fig. 2. (color online) Principle diagram of deformable mirror wavefront correction.

2.3 夏克-哈特曼传感器检测波前误差原理

相对于干涉仪来说, 夏克-哈特曼波前传感器^[10]具有结构简单、体积小、易操作、探测时间短、抗环境干扰能力强等优点, 最早被应用在对自适应光学系统的波前实时检测中. 未来随着计算机计

式中, Z 为元件表面某点处的矢高, c 为表面顶点的曲率, k 为表面的 conic 系数, Z_j 为第 j 阶 Zernike 项, C_{j+1} 为 Z_j 的系数, r 为表面某点到原点的距离.

算能力及 CCD 探测元件的迅速发展, 夏克-哈特曼波前传感器的测量精度会越来越高, 动态范围会越来越大, 应用领域也将随之变宽. 而且已有的商用夏克-哈特曼波前传感器具有采用算法重新标定的方法探测不同入射角度波像差的能力, 因此满足离轴反射变焦距光学系统对不同视场波像差检测的要求. 夏克-哈特曼波前传感器检测波前原理基于波前斜率检测, 其结构主要由微透镜阵列和高速 CCD 组成^[11], 如图 3 所示. 探测波前经微透镜阵列分光后聚焦到探测器的接收面上, 形成一个光斑阵列, 各个光斑质心位置相对于各自孔径中心的偏移量与当前孔径内的波前平均斜率相关, 如 (2) 式和 (3) 式所示:

$$\frac{f}{S} \iint_{\text{Sub}} \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} dx dy = \Delta x, \quad (2)$$

$$\frac{f}{S} \iint_{\text{Sub}} \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} dx dy = \Delta y, \quad (3)$$

其中, $W(x, y)$ 为探测波前相位, $\Delta x, \Delta y$ 为光斑相对于中心位置的偏离量, f 为微透镜的焦距, S 为子孔径面积.

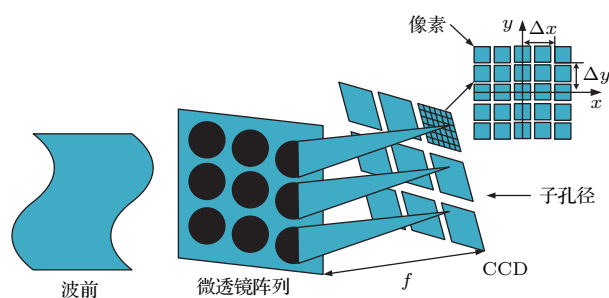


图3 (网刊彩色) 夏克-哈特曼波前传感器原理示意图

Fig. 3. (color online) Principle diagram of the Shark-Hartmann wavefront sensor.

利用质心算法求出每个光斑质心相对中心位置的偏离量, 根据波前重构算法重构出探测波前, 重构波前的方法主要有区域法和模式法^[12-14]. 在对光学系统和光学元件检测中, 由于采用模式法的波前重构在像差分析和模式控制方面要优于区域法, 因此本文采用模式法^[15]进行波前重构, 即波前相位可用正交的 Zernike 多项式展开为如下表示形式:

$$W(x, y) = \sum_{k=1}^N C_k Z_k(x, y), \quad (4)$$

其中 C_k 为 Zernike 多项式的系数. 把 (4) 式代入 (2) 式和 (3) 式中可以得到

$$\frac{f}{S} \iint_{\text{Sub}} C_k \frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial x} dx dy = \Delta x, \quad (5)$$

$$\frac{f}{S} \iint_{\text{Sub}} C_k \frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial y} dx dy = \Delta y. \quad (6)$$

由于高速 CCD 采样是离散化的, 将 (5) 式和 (6) 式改写成矩阵形式:

$$\mathbf{G} = \nabla \mathbf{Z} \cdot \mathbf{C}, \quad (7)$$

其中, $\mathbf{G}$ 为 $2M \times 1$ 斜率向量, $\nabla \mathbf{Z}$ 为 $2M \times N$ 矩阵, $\mathbf{C}$ 为 $N \times 1$ 系数列向量, M 为采集点数目, N 为多项式项数.

先通过最小二乘法求解出 $\nabla \mathbf{Z}$ 的广义逆矩阵 $(\nabla \mathbf{Z})^{-1}$, 再求出 Zernike 多项式系数 $\mathbf{C}$, 从而可以得到待测的离轴反射变焦距光学系统在各个视场下的波前误差.

2.4 激光器阵列标定的原理

为了给检测装置提供不同视场的入射光源, 采

用激光器阵列作为光源, 如图 4 所示, L1, L2 和 L3 分别代表出射不同方向的激光器, 它们发出的光束通过准直扩束系统后, 作为待测系统中不同视场的光源. 通过对激光器阵列有效标定和合理开关, 可以使激光器阵列准确提供不同方向的光源.

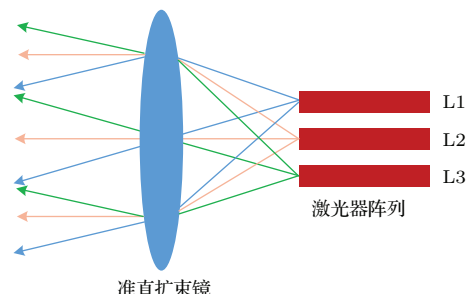


图4 (网刊彩色) 激光器阵列标定原理图

Fig. 4. (color online) Principle diagram for the calibration of the laser source array.

3 离轴三反变焦距光学系统多视场检测仿真及结果分析

本文基于第二节提出的离轴反射变焦距光学系统多视场检测方法, 设计了离轴三反变焦距光学系统, 来对所提的检测方案进行验证. 离轴三反变焦距光学系统的参数如表 2 所示, 光学系统三维结构如图 5 所示. 变焦距系统采用机械补偿的方式, 主镜 M1 位置保持不变, 而将次镜 M2 和三镜 M3 分别作为“变倍组”和“补偿组”, 在系统变焦过程中, 利用电动位移装置分别控制它们进行相应的移动. 系统调焦结束后, 需要对离轴三反变焦距光学系统各视场的波像差进行检测, 并将检测结果代入计算机辅助装调软件, 以计算次镜和三镜的失调量, 进而根据求解的失调量微调 M2 和 M3 的位置来完成系统的最终装调. 图 5 中红虚线箭头表示 M2 和 M3 移动的方向, M2' 和 M3' 表示 M2 和 M3 变焦后的位置.

表 2 离轴三反变焦距光学系统参数

Table 2. The parameters of the off-axis three-mirror reflective zoom system.

参数	长焦	短焦
焦距 /mm	75	25
视场范围/(°)	3—5.5	7—14
F 数	12	4
波长/nm	486—850	

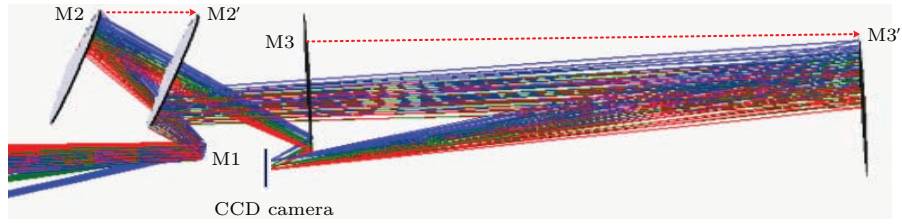


图5 (网刊彩色) 离轴三反变焦距光学系统三维结构图

Fig. 5. (color online) The three-dimensional structure of the off-axis three-mirror reflective zoom system.

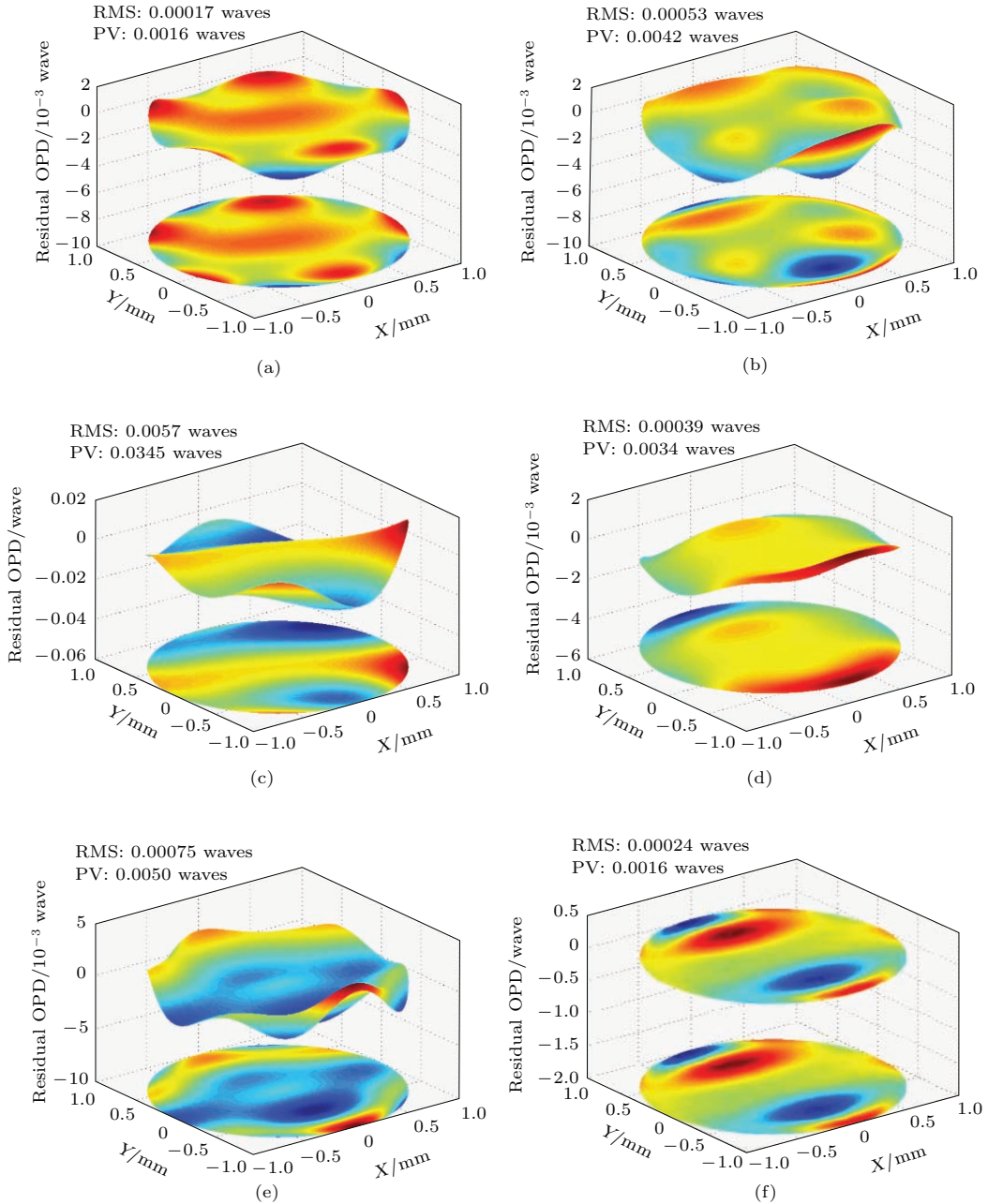


图6 (网刊彩色) (a), (b), (c) 分别对应焦距 25 mm 状态中视场 7° , 9.8° , 14° 的系统的波前图; (d), (e), (f) 分别对应焦距 75 mm 状态中视场 3° , 4.2° , 5.5° 的系统的波前图

Fig. 6. (color online) The figure (a), (b), (c) respectively show the system wavefront aberration of the field of view 7° , 9.8° , 14° at the focal length of 25 mm; figure (d), (e), (f) respectively show the system wavefront aberration of the field of view 3° , 4.2° , 5.5° at the focal length of 75 mm.

基于 CODE V 光学设计软件, 结合图 1 所示的多视场系统检测装置, 对离轴三反变焦距光学系统在不同视场下波像差检测进行仿真模拟. 仿真结果见图 6, 仿真获得的波像差是离轴三反变焦距光学系统利用变形镜补偿后的剩余波像差, 其中变形镜面型用前 37 项标准泽尼克多项式表示. 从图 6 中可以看出, 离轴三反变焦距光学系统在短焦 25 mm 处 Y 视场 7° , 9.8° , 14° 的剩余波像差的 RMS 值分别为 0.00017λ , 0.00053λ , 0.0057λ , 在焦距 75 mm 处 Y 视场 3° , 4.2° , 5.5° 的剩余波像差的 RMS 值分别为 0.00039λ , 0.00075λ , 0.0024λ , 可以发现通过变形镜补偿后, 各视场下的剩余波像差符合夏克-哈特曼波前传感器对多视场下波像差检测的要求.

4 结 论

同时检测离轴反射变焦距光学系统各个视场下的波像差有助于提高计算机辅助装调的准确性. 本文在自准直干涉法的基础上进行改进, 将变形镜的补偿检测技术和夏克-哈特曼波前传感器的波前检测技术相结合, 并配合激光器阵列光源, 解决了离轴反射变焦距光学系统多视场波像差检测的难题. 借助 CODE V 光学设计软件, 将此检测方法应用于离轴三反变焦距光学系统, 对该系统在各个视场的波像差检测进行仿真, 仿真结果验证了该方法的可行性. 与自准直干涉法对比, 所提出的多视场波像差检测方法具有检测时间短、精度高等优点, 对离轴反射变焦距光学系统计算机辅助装调技术具有很重要的应用价值.

参考文献

- [1] Johnson R B, Hadaway J B, Burleson T A, Watts B, Park E D 1991 *SPIE* **1354** 669
- [2] Yang X F, Zhang X H, Han C Y 2004 *Opt. Precision Eng.* **12** 270 (in Chinese) [杨晓飞, 张晓辉, 韩昌元 2004 光学精密工程 **12** 270]
- [3] Gong D, Tian T Y, Wang H 2010 *Opt. Precision Eng.* **18** 1754 (in Chinese) [巩盾, 田铁印, 王红 2010 光学精密工程 **18** 1754]
- [4] Novak J, Novak P, Miks A 2007 *SPIE* **6609** 11
- [5] Saita Y, Shinto H, Nomura T 2015 *Optica* **5** 411
- [6] Cheng S Y, Liu W J, Chen S Q, Dong L Z, Yang P, Xu B 2015 *Chin. Phys. B* **24** 391
- [7] Zhang J P 2012 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [张金平 2012 博士学位论文 (长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)]
- [8] Sun Q Q, Hu X Q 2015 *Opt. Technol.* **41** 166 (in Chinese) [孙倩倩, 胡新奇 2015 光学技术 **41** 166]
- [9] Ning Y, Yu H, Zhou H, Rao C H, Jiang W H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4717 (in Chinese) [宁禹, 余浩, 周虹, 饶长辉, 姜文汉 2009 物理学报 **58** 4717]
- [10] Luo Q, Huang L H, Gu N T, Rao C H, Rao C H 2012 *Chin. Phys. B* **21** 251
- [11] Dainty C 2008 *Adaptive Optics for Industry and Medicine* (Germany: Munster) pp103–207
- [12] Schulz G, Schwider J 1967 *Appl. Opt.* **6** 1077
- [13] Schulz G, Schwider J, Hiller C, Kicker B 1971 *Appl. Opt.* **10** 929
- [14] Fritz S B 1984 *Opt. Eng.* **23** 379
- [15] Xie W K, Gao Q, Ma H T, Wei W J, Jiang W J 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 144201 (in Chinese) [谢文科, 高穹, 马浩统, 魏文俭, 江文杰 2015 物理学报 **64** 144201]

Novel multiple field of view detection method for the off-axis reflection zoom optical system*

Zhou Ji-De Chang Jun[†] Niu Ya-Jun Xie Gui-Juan Wang Xi

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(Received 27 September 2015; revised manuscript received 1 January 2016)

Abstract

In order to study the computer-aided alignment for the off-axis reflective zoom optical system, the wavefront aberration of the off-axis reflective zoom system across the field of view needs to be detected. Obtaining the wavefront aberration across the field of view could improve the accuracy of the computer-aided alignment for the off-axis reflective zoom optical system. Restricted by the current wavefront aberration detection technology, only the wavefront aberration at a field degree of 0° could be detected. To solve this problem, a new method to detect the wavefront aberration of off-axis reflective zoom system across the field of view is proposed. According to the traditional autocollimation interferometry method, we improve the detection method by substituting the scan of standard plane mirror with the deformable mirror, replacing the interferometer with Shark-Hartmann sensor and employing the accurately calibrated laser source array to realize the wavefront aberration detection at multiple field of view simultaneously. The simulation shows that the residual wavefront aberration root-mean-square values after compensating for the deformation mirror in the following 6 fields of view ($0^\circ, 3^\circ$), ($0^\circ, 4.2^\circ$), ($0^\circ, 5.5^\circ$), ($0^\circ, 7^\circ$), ($0^\circ, 9.8^\circ$), and ($0^\circ, 14^\circ$) are 0.00039λ , 0.00075λ , 0.00024λ , 0.00017λ , 0.00053λ , and 0.0057λ , respectively. It shows that the detection method we proposed is suitable for the computer-aided alignment technology for the off-axis reflective zoom system.

Keywords: wavefront aberration of optical system detection, computer-aided alignment, Shark-Hartmann sensor, off-axis reflective zoom system

PACS: 42.87.-d, 42.15.Dp, 42.15.-i, 42.40.My

DOI: [10.7498/aps.65.084208](https://doi.org/10.7498/aps.65.084208)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61178041).

[†] Corresponding author. E-mail: bitchang@bit.edu.cn