

## 折反式变形光学系统偏振像差分析及其对点扩散函数影响

马士杰 吴洪波 赵尚男 吴庆 张新

### Polarization aberration analysis of catadioptric anamorphic optical systems and its effect on the point spread function

MA Shi-jie, WU Hong-bo, ZHAO Shang-nan, WU Qing, ZHANG Xin

#### 引用本文:

马士杰, 吴洪波, 赵尚男, 吴庆, 张新. 折反式变形光学系统偏振像差分析及其对点扩散函数影响[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2024-0010

MA Shi-jie, WU Hong-bo, ZHAO Shang-nan, WU Qing, ZHANG Xin. Polarization aberration analysis of catadioptric anamorphic optical systems and its effect on the point spread function[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2024-0010

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0010>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 折反式变形光学系统设计

Design of catadioptric anamorphic optical system

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1376 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0035>

#### 基于焦面复制方法的自适应光学系统静态像差校正技术

Static aberration correction technique for adaptive optics system based on focal-plane copy approach

中国光学 (中英文). 2022, 15(3): 545 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0182>

#### 多维度单分子成像研究进展

Advances in multi-dimensional single molecule imaging

中国光学 (中英文). 2022, 15(6): 1243 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0088>

#### 空间引力波探测望远镜光学系统设计

Optical design of space gravitational wave detection telescope

中国光学 (中英文). 2022, 15(4): 761 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0018>

#### 光学系统降敏设计方法综述

Review of optical systems' desensitization design methods

中国光学 (中英文). 2022, 15(5): 863 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0096>

#### 轻小型金属基增材制造光学系统

Light-and-small optical systems by metal-based additive manufacturing

中国光学 (中英文). 2022, 15(5): 1019 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0128>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-11

## 折反式变形光学系统偏振像差分析 及其对点扩散函数影响

马士杰<sup>1,2,3</sup>, 吴洪波<sup>1,3\*</sup>, 赵尚男<sup>1,2,3</sup>, 吴庆<sup>1,2,3</sup>, 张新<sup>1,3</sup>

(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;

3. 光学系统先进制造全国重点实验室 吉林 长春 130033)

**摘要:**目的: 变形光学系统是一种具有双平面对称性的相对特殊的光学系统, 其结构引起了非旋转对称的偏振像差。本论文构建一个折反式变形光学系统, 并对该系统的偏振像差及其对点扩散函数的影响进行系统分析, 为后续变形光学系统的设计提供参考。方法: 基于三维偏振光线追迹对折反式变形光学系统进行仿真计算, 获得偏振像差的详细数据, 并计算各个表面的二向衰减、相位延迟分布特性以及系统的琼斯瞳、振幅响应矩阵、点扩散函数和偏振串扰对比度。结果: 最大二向衰减为 0.145, 最大相位延迟为  $1.46 \times 10^{-2}$  rad, 均出现在次镜位置。2:1 变形比的光学系统的振幅响应函数在长焦端和短焦端方向偏振串扰项存在 40.6% 的差异, 偏振串扰对于该变形光学系统对比度限制在  $10^{-6}$  量级。结论: 高精度变形光学系统中的偏振像差不可忽略, 可采用膜层设计和折反式结构等方法降低偏振像差影响。该研究结论可为变形光学系统在深空探测、相干通信系统等领域的设计提供参考。

**关键词:** 变形光学系统; 偏振像差; 点扩散函数; 琼斯瞳

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2024-0010

## Polarization aberration analysis of catadioptric anamorphic optical systems and its effect on the point spread function

MA Shi-jie<sup>1,2,3</sup>, WU Hong-bo<sup>1,3\*</sup>, ZHAO Shang-nan<sup>1,2,3</sup>, WU Qing<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Xin<sup>1,3</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130033;

2. University of Chinese Academy of Sciences Beijing, 100049;

3. Key laboratory of Advanced Manufacturing of Optical Systems Changchun, 130033)

\* Corresponding author, E-mail: wuhongbo@ciomp.ac.cn

**Abstract: Objective:** The anamorphic optical system is a relatively special optical system with bi-planar symmetry, whose structure gives rise to non-rotationally symmetric polarization aberrations. This thesis constructs a foldback anamorphic optical system. It also systematically analyzes the polarization aberration of

收稿日期: 2024-01-10; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 62005271; 基于平面超透镜阵列的集成光学干涉成像机理研究 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 青年科学基金项目

Supported by

this system and its effect on the point spread function, with the aim of providing a reference for the design of subsequent anamorphic optical systems. **Method:** Simulations of a folded-reversal anamorphic optical system based on a three-dimensional polarized light trace were performed to obtain detailed data on the polarization aberration and to compute the two-way attenuation and phase delay distribution characteristics of individual surfaces, as well as the Jones pupil, the amplitude response matrix, the point spread function, and the polarization crosstalk contrast of the system. **Result:** The maximum two-way attenuation is 0.145, and the maximum phase delay is  $1.46 \times 10^{-2}$  rad, both occurring at the secondary mirror position. The amplitude response function of the optical system with a 2:1 anamorphic ratio has a 40.6% difference between the polarization crosstalk term in the long and short focal end directions, and the polarization crosstalk is limited by an order of magnitude of  $10^{-6}$  for this anamorphic optical system contrast. **Conclusion:** Polarization aberration in high-precision anamorphic optical systems is not negligible. The effects of polarization aberration can be reduced by film layer design and folded-back structure. The conclusions of this study can serve as a reference for designing anamorphic optical systems in deep space exploration and coherent communication systems.

**Key words:** anamorphic optical systems; polarization aberration; point spread function; Jones pupil

## 1 引言

镜片表面的偏振像差源于菲涅尔方程与薄膜方程的相互作用<sup>[1]</sup>。其本质在于光线以非垂直角度入射光学界面。一般而言,相对于波像差,偏振像差对成像的影响较小,在许多光学系统中通常被忽略。然而,随着现代光学技术的不断演进,尤其是对高数值孔径镜头、遥感、天文观测等高精度观测和光学系统性能需求的日益提高,偏振引起的影响逐渐显现<sup>[2-6]</sup>。

变形光学系统表现出在正交的  $x$  和  $y$  方向上具有不同焦距的特性,从而实现了对物方视场的扩展,不受探测器纵横比的限制。因此,该系统的设计实现了在一个方向上拓宽视场的能力,同时不对另一个方向的视场产生影响<sup>[7]</sup>。尽管变形光学系统提供了拓展视场角的方式,但同时也引入了非旋转对称的偏振像差。因此,深入研究变形光学系统中偏振像差的作用机理对于理解和优化该类像差,以实现高精度成像具有重要意义。在这一背景下,对于变形光学系统中偏振像差的深入研究将有助于提高光学系统的性能,以满足现代精密成像的需求。

过去的研究已经在不同的光学系统中广泛探讨了偏振像差的影响。1987年,Chipman引入了偏振像差理论<sup>[8]</sup>,为该领域奠定了基础。1994年,

McGuire 等人将对偏振像差的分析推进至偏振像差矩阵的形式<sup>[9]</sup>,进一步深化了对这一现象的理解。2014年,Sasian从场和波阵面的角度对偏振像差进行了全面的系统分析<sup>[10]</sup>。2016年,杨飞宇聚焦于相干通信系统中的偏振像差分析<sup>[11]</sup>。2020年,罗敬的研究针对无遮拦离轴三反天文望远镜,探讨了偏振像差及其对光学畸变的影响<sup>[5]</sup>。2021年,张艺蓝等人深入研究了离轴自由曲面的偏振像差特性<sup>[6]</sup>。2022年,王凯凯等人研究了含有数字微镜的离轴光学系统偏振像差,并对偏振像差进行补偿优化<sup>[12]</sup>。

然而,上述研究仅限于非变形光学系统。变形光学系统具有大视场角和结构紧凑等特点。目前,变形光学系统中的偏振像差尚未受到深入的研究。由于变形光学系统具有双平面对称性,这为光线传播和偏振效应引入了新的挑战<sup>[13]</sup>。对于变形光学偏振像差的分析需要深入研究系统的设计、成像特性以及光学元件的影响。

本文基于偏振光线追迹的方法,对折反式变形光学系统的偏振像差进行了系统性研究。分析了系统中各个表面的二向衰减和相位延迟、系统的琼斯光瞳和振幅响应矩阵,针对带有偏振像差的点扩散函数进行了详细分析,并深入探究偏振串扰对成像对比度的影响。这些研究结果为后续折反式变形光学系统在偏振领域的应用设计提供了重要参考。

## 2 折反式变形光学系统的构建与偏振像差的计算

### 2.1 折反式变形光学偏振像差的主要成因

光学系统中引起偏振的原因主要来自于偏振元件, 例如偏振器、波片、CGH、衍射光栅、镀有薄膜的光学界面等, 几乎所有的光学元件都会引起偏振。在折反式系统中镀有薄膜的反射镜和透镜是引起偏振的主要因素。

在光学界面上非正入射光都会引起偏振像差。根据菲涅尔公式, 当光线以非垂直角度射入光学界面时, 反射系数( $r_s$ 、 $r_p$ )会呈现不相等的情况, 透射系数( $t_s$ 、 $t_p$ )也会呈现不相等的情况, 因此 s 方向和 p 方向偏振光振幅产生差异。这种现象可以通过二向衰减  $D$  来描述, 其表达式如公式 1 所示。

$$D = \frac{|r_s|^2 - |r_p|^2}{|r_s|^2 + |r_p|^2}, 0 \leq D \leq 1, \quad (1)$$

p 光相位  $\varphi_p$  和 s 光相位  $\varphi_s$  产生的差异可以通过相位延迟  $\delta$  来描述, 表达式如公式 2 所示。

$$\delta = |\varphi_p - \varphi_s|, \quad (2)$$

光学系统的偏振像差主要受到系统结构和光学镀膜特性的影响。折反射变形光学系统由面型为双锥面的反射镜和透镜组成, 其中反射镜镀有铝反射膜, 透镜镀有增透膜。以中心波长为 590 nm 的铝反射膜为例, 其复折射率为  $n=1.15+7.15i$ 。图 1 为铝反射膜的反射系数和相位随入射角的变化关系, 图 2 为透镜上增透膜的透射系数和相位随入射角的变化关系。随着入射角的增大, 反射镜和透镜上的二向衰减和相位延迟也相应增加。

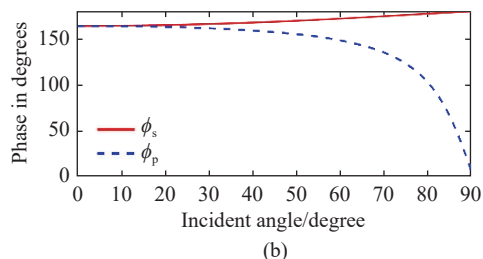
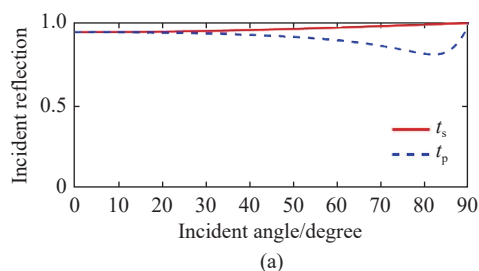


图 1 铝反射膜 (a)  $r_s$ 、 $r_p$  反射系数随入射角变化曲线、(b)  $\Phi_s$ 、 $\Phi_p$  相位随入射角变化曲线

Fig. 1 (a) Variations of amplitude reflection for  $r_s$   $r_p$  with incident angle (b) Variations of phase reflection for  $r_s$   $r_p$  with incident angle

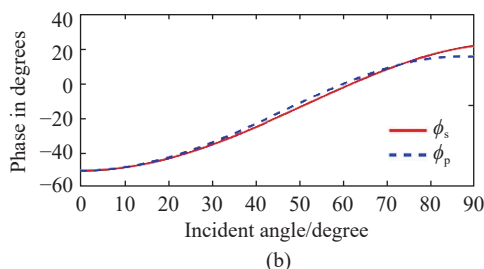
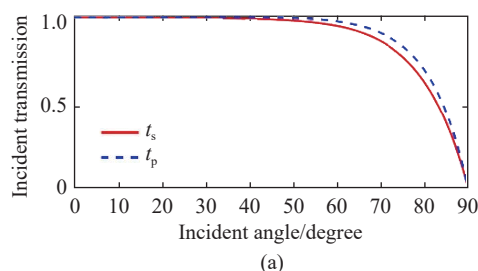


图 2 增透膜 (a)  $t_s$ 、 $t_p$  透射系数随入射角的变化曲线、(b)  $\Phi_s$ 、 $\Phi_p$  相位随入射角的变化曲线

Fig. 2 AR coating (a) Variations of amplitude transmission for  $t_s$   $t_p$  with incident angle (b) Variations of phase transmission for  $t_s$   $t_p$  with incident angle

### 2.2 三维偏振光线追迹

目前, 针对偏振像差的计算主要采用三维偏振光线追迹方法, 这一方法是对传统的几何光线追迹方法的一项拓展和延伸。偏振光线追迹方法以电磁波的波动性质为基础, 考虑了光线的偏振状态随着传播路径的变化而发生的变化, 从而更全面地描述了光学系统中的偏振效应。

本文开发了一个偏振光线追迹代码, 用于模拟计算变形光学系统的偏振像差。偏振光线追迹采用了 Yun 等人<sup>[15]</sup>描述的三维方法, 并编写了一个 Zemax 编程语言宏, 用于追迹一组离散光线网格, 并输出各个表面的琼斯矩阵以及出瞳处的琼斯矩阵。这些光线从系统的入瞳追迹到系统的出瞳。

在 Yun 等人的工作中,对三维偏振光线追迹矩阵进行了完整的推导,在此简要概述。三维偏振光线追迹算法中光学元件及系统相互作用导致的三维电场变化可由一个矩阵表示,如公式 3 所示。这个定义在全局坐标系中的矩阵称为偏振光线追迹矩阵  $P_q$ 。 $q$  表示界面顺序, $q-1$  表示  $q$  的前一个界面。

$$E_q = \begin{pmatrix} E_{x,q} \\ E_{y,q} \\ E_{z,q} \end{pmatrix} = P_q \cdot E_{q-1}, \quad (3)$$

追迹矩阵  $P_q$  为界面处三个矩阵的乘积,如公式 4 所示。其中  $Q_{in,q}^{-1}$  将全局坐标系变换为局部坐标系,  $Q_{out,q}$  则是将局部坐标系转化为全局坐标系,  $J_q$  为光学表面的琼斯矩阵,如公式 5 所示。

$$P_q = Q_{out,q} \cdot J_q \cdot Q_{in,q}^{-1}, \quad (4)$$

$$Q_{in,q}^{-1} = \begin{pmatrix} \vec{s}_{x,q} & \vec{s}_{y,q} & \vec{s}_{z,q} \\ \vec{p}_{x,q} & \vec{p}_{y,q} & \vec{p}_{z,q} \\ \vec{k}_{x,q-1} & \vec{k}_{y,q-1} & \vec{k}_{z,q-1} \end{pmatrix}$$

$$Q_{out,q} = \begin{pmatrix} \vec{s}_{x,q} & \vec{p}_{x,q} & \vec{k}_{x,q} \\ \vec{s}_{y,q} & \vec{p}_{y,q} & \vec{k}_{y,q} \\ \vec{s}_{z,q} & \vec{p}_{z,q} & \vec{k}_{z,q} \end{pmatrix}$$

$$J_q = \begin{pmatrix} r_s e^{i\varphi_s} & 0 & 0 \\ 0 & r_p e^{i\varphi_p} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

光线依次通过各个光学表面的变化可由  $P_q$  进行表征,将这些矩阵连乘就能得到整条光路的偏振光线追迹矩阵  $P_{total}$ ,如公式 6 所示。

$$P_{total} = P_Q \cdot P_{Q-1} \cdots P_2 \cdot P_1 = \prod_{q=Q-1}^1 P_q, \quad (6)$$

### 2.3 折反式变形光学系统构建

折反式变形光学系统如图 4 所示,工作波长为 480 nm–650 nm。该系统由两个 biconic 面型反射镜 M1、M2 和两个 biconic 面型透镜 L1、L2 组成。biconic 表面由公式 7 描述,其中  $c_x$ 、 $c_y$ 、 $k_x$ 、 $k_y$  分别是  $x$  和  $y$  方向上的曲率和圆锥系数。反射镜镀有铝反射膜。透镜镀有增透膜。光学系统的总体参数列于表 1,光学系统的调制传递函数(MTF)如图 3 所示。

$$z = \frac{c_x x^2 + c_y y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_x) c_x^2 x^2 - (1 + k_y) c_y^2 y^2}}, \quad (7)$$

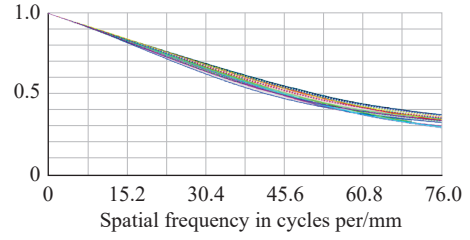


图 3 系统 MTF 曲线

Fig. 3 MTF curve of the optical system

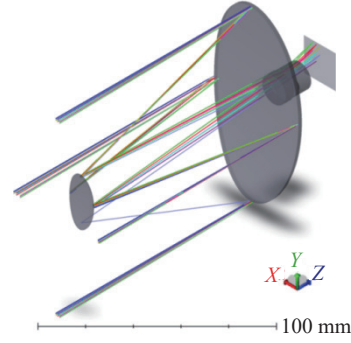


图 4 系统等轴侧视图

Fig. 4 Isometric side view of system

表 1 光学系统参数

Tab. 1 Parameters of optical system

参数	数值
波长/ $\mu\text{m}$	0.48-0.65
F数	10
X方向视场角/ $^\circ$	1
Y方向视场角/ $^\circ$	0.5
X方向焦距/mm	1000
Y方向焦距/mm	500
X方向系统孔径/mm	50
Y方向系统孔径/mm	100
Detector array size /pixel	2160×2160
Detector array size / $\mu\text{m}$	6.61

## 3 计算结果分析

### 3.1 二向衰减与相位延迟分析

图 4 中的光学系统由两块反射镜 M1 和 M2 以及两块透镜 L1 和 L2 构成。通过采用偏振光线追迹方法,获取了在各个光学界面上中心视场的二向衰减和相位延迟分布情况。图 8 展示了二向衰减的计算结果,图 9 展示了相位延迟的计算结果。横坐标和纵坐标分别表示了归一化光瞳的

坐标。在二向衰减图中, 线段长度代表二向衰减数值, 线段方向代表最大透过率轴方向。在相位延迟图中, 线段长度代表相位延迟数值, 线段方向代表快轴方向。

根据图 8 和图 9 中呈现的二向衰减和相位延迟结果, 我们可以观察到两个关键点: 1、二向衰减与相位延迟图缺失了旋转对称性, 每个光学表面上  $x$  和  $y$  方向的入射角产生较大的差异, 这是变形光学系统缺失了旋转对称性的原因; 2、金属反射镜界面的最大透过率轴方向为  $p$  光方向, 而透镜界面的最大透过率轴方向为  $s$  光方向。这是由于光学介质的本征性质所导致的, 因此可以通过反射镜与透镜的组合实现折反式系统的偏振像差补偿。

根据图 8, 各个光学面的二向衰减值的最大值依次为:  $9.49 \times 10^{-4}$ 、 $1.45 \times 10^{-1}$ 、 $9.40 \times 10^{-6}$ 、 $9.40 \times 10^{-6}$ 、 $1.59 \times 10^{-4}$ 、 $1.59 \times 10^{-4}$ 。与主镜、L1 前表面、L1 后表面、L2 前表面、L2 后表面相比, 次镜上的二向衰减值较大, 且最大值出现在该光学表面。

相位延迟在物理上表示了偏振光通过光学系统后引入的额外相位差, 存在于相互正交的  $s$  光和  $p$  光之间, 影响到图像的清晰度和质量。相位延迟是光学系统中的一个重要参数, 对于高精度成像和光学性能评估至关重要。根据图 9, 各个光学面的相位延迟最大值依次为  $9.49 \times 10^{-3}$  rad、 $1.46 \times 10^{-2}$  rad、 $4.5 \times 10^{-5}$  rad、 $4.49 \times 10^{-5}$  rad、 $2.09 \times 10^{-3}$  rad、 $3.73 \times 10^{-5}$  rad。其中, 次镜上的相位延迟最大。

二向衰减与相位延迟的最大值均集中在次镜。这是因为次镜上的光学入射角最大, 达到了  $12.9^\circ$ 。较大的入射角度会显著增加偏振像差, 而减小入射角则有助于降低偏振像差。

分别仿真面型为双锥面,  $x$  方向焦距均为  $1000$  mm,  $y$  方向均为  $500$  mm, 波前  $RMS < 1/30\lambda$ , 主镜次镜间隔长度分别为  $80$  mm、 $90$  mm、 $100$  mm 的变形系统, 如图 5 所示。并绘制主镜次镜表面最大二向衰减值以及相位延迟值与主镜次镜间隔长度的曲线图, 如图 6 所示。发现在折反式变形系统中将主镜和次镜间距增大, 有助于降低主镜和次镜上的二向衰减和二向延迟。因此, 在折反式光学设计中增大主镜和次镜的间隔有助于降低偏振像差的影响。

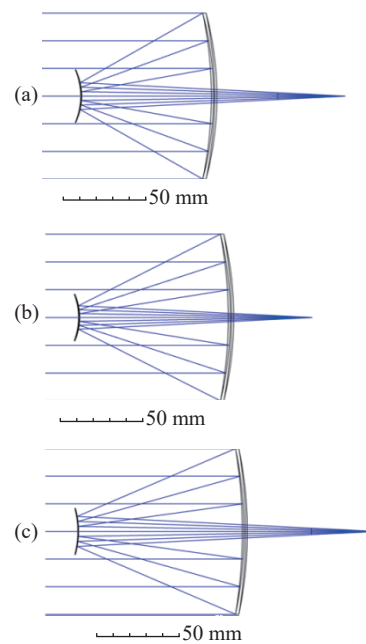


图 5 (a) 系统 1, 主镜与次镜间距  $80$  mm; (b) 系统 2, 主镜和次镜间距  $90$  mm; (c) 系统 3, 主镜和次镜间距  $100$  mm。

Fig. 5 (a) System1, the length of the primary and secondary mirror  $80$  mm; (b) the length of the primary and secondary mirror  $90$  mm; (c) the length of the primary and secondary mirror  $100$  mm.

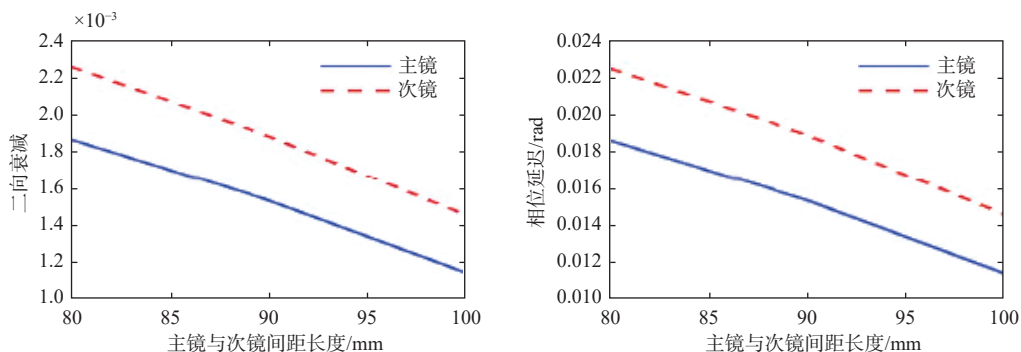


图 6 (a) 不同主镜与次镜间距长度对应的最大二向衰减; (b) 不同主镜与次镜间距长度对应的最大相位延迟;

Fig. 6 (a) Maximum diattenuation corresponding to the length of the primary and secondary mirror; (b) Maximum retardance corresponding to the length of the primary and secondary mirror

通过三维偏振光线追迹可以得到系统的偏振追迹矩阵  $P_{total}$ 。在光学系统中  $P_{total}$  可以近似分解为式 8。

$$J = te^{i\phi} J_{pol}(d, \theta) J_{ret}(\phi, \beta), \quad (8)$$

所以我们对  $P_{total}$  进行 SVD 奇异值分解, 如公式 9 所示。根据 Bernd Geh 等人对于系统二向衰减和相位延迟的定义<sup>[7]</sup>, 计算得到出瞳处中心视场的二向衰减和相位延迟, 如图 7 所示。

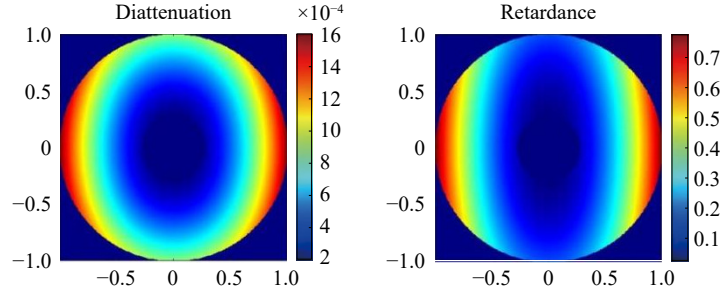


图 7 出瞳面零视场(a)二向衰减图; (b)相位延迟图, 单位为度。

Fig. 7 Exit Pupil Zero-Field (a) Diattenuation Map; (b) Retardance map, the unit is degree.

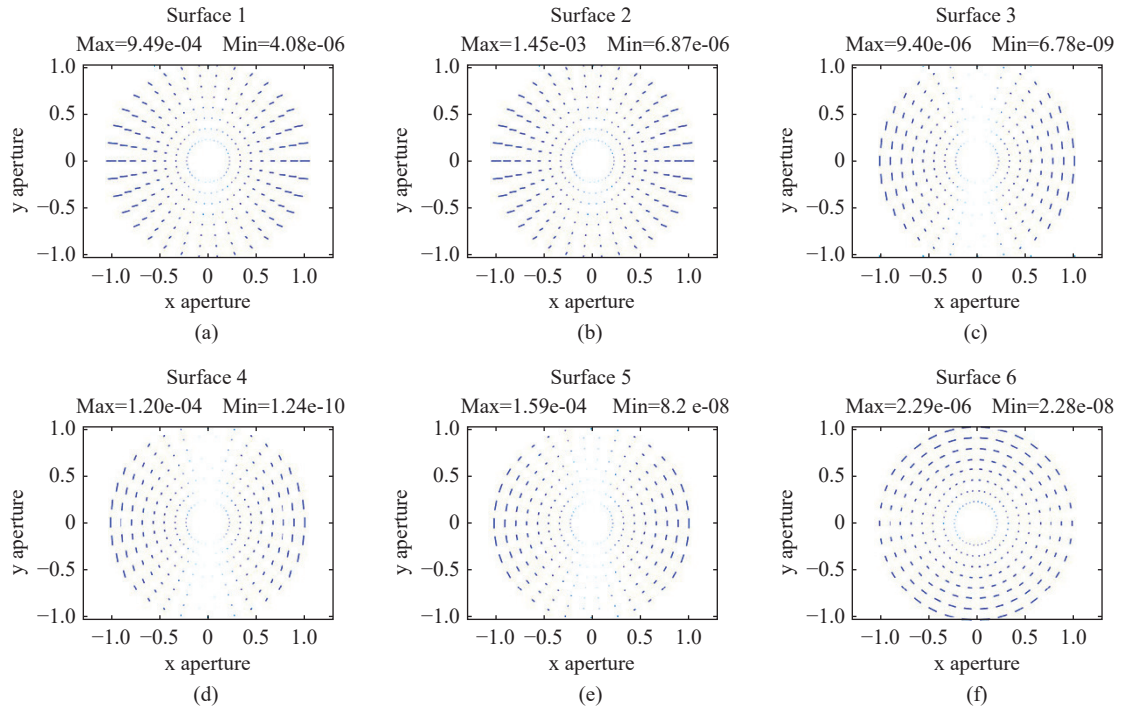


图 8 折返式变形光学系统各个光学表面的中心二向衰减分布图。线段长度代表二向衰减值, 线段方向代表最大透过率轴方向。(a) M1; (b) M2; (c) L1 前表面; (d) L1 后表面; (e) L2 前表面; (f) L2 后表面。

Fig. 8 Diattenuation maps for each mirror and lens element in the designed catadioptric anamorphic optical system. (a) M1; (2) M2; (c) L1 front; (d) L1 rear; (e) L2 front; (f) L2 rear

折返式变形光学系统的二向衰减和相位延迟与传统卡塞格林望远镜存在较大差异, 原因在于变形系统存在 1:2 变形比。这导致在各个光学

面上  $y$  方向曲率半径小于  $x$  方向, 所以  $y$  方向入射角小于  $x$  方向入射角。最终使得  $y$  方向偏振像差小于  $x$  方向偏振像差。

$$P_{total} = USV^+ = \begin{bmatrix} k_{x,Q} & u_{x,1} & u_{x,2} \\ k_{y,Q} & u_{y,1} & u_{y,2} \\ k_{z,Q} & u_{z,1} & u_{z,2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \Lambda_1 & 0 \\ 0 & 0 & \Lambda_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_{x,0} & k_{y,0} & k_{z,0} \\ v_{x,1} & v_{y,1} & v_{z,1} \\ v_{x,2} & v_{y,2} & v_{z,2} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

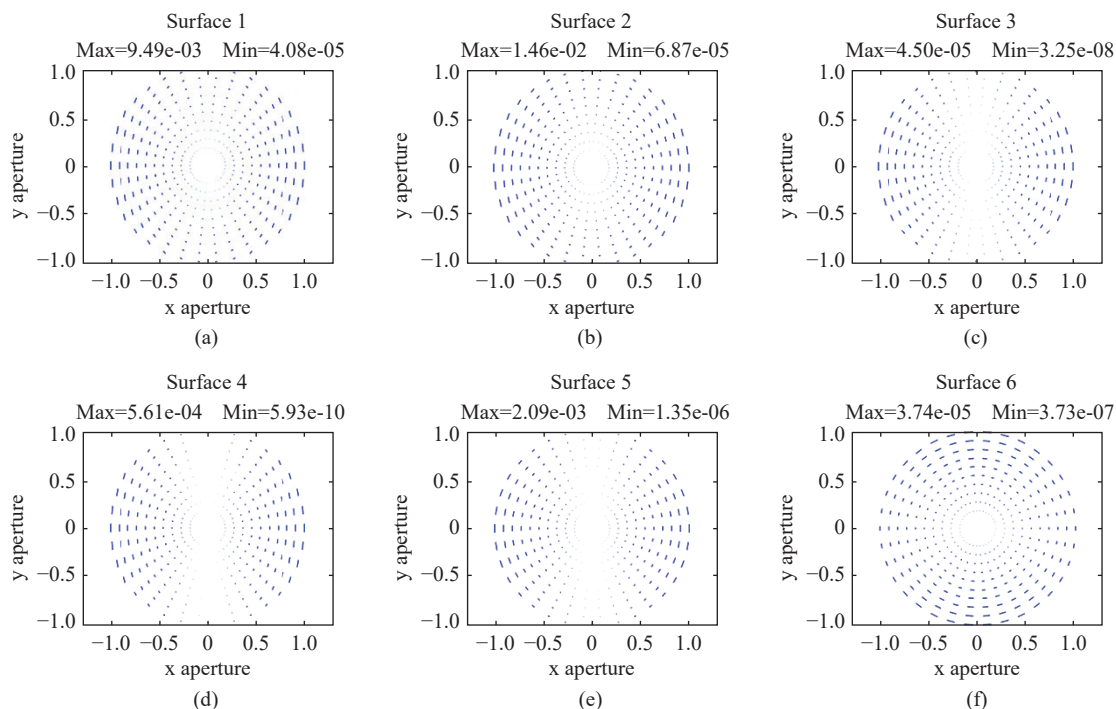


图 9 折反式变形光学系统各个光学表面的中心视场相位延迟分布图。线段长度代表相位延迟值, 线段方向代表快轴方向。(a) M1; (b) M2; (c) L1 前表面; (d) L1 后表面; (e) L2 前表面; (f) L2 后表面。

Fig. 9 Retardance maps for each mirror and lens element in the designed catadioptric anamorphic optical system. (a) M1; (2) M2; (c) L1 front; (d) L1 rear; (e) L2 front; (f) L2 rear

### 3.2 琼斯瞳

通过以上偏振光线追迹计算, 获得了在特定视场坐标和光瞳坐标下的琼斯矩阵。值得注意的是, 光学系统针对每一条独立的光线都有一个独立的琼斯矩阵, 这是因为不同光线在系统内的传播路径存在差异, 因此导致了它们的琼斯矩阵各异。为了全面展示整个系统的偏振特性, 将同一视场下所有光瞳坐标的琼斯矩阵集合起来, 形成了琼斯瞳。在公式 10 中,  $A_{xx}$  表示的是入瞳处  $X$  方向偏振分量转化为出瞳处  $X$  方向偏振分量的振幅变化量。而  $A_{xy}$  则表示的是入瞳处  $X$  方向偏振分量转化为出瞳处  $Y$  方向偏振分量的振幅变化量。另外,  $\Phi_{xx}$  代表的是入瞳处  $X$  方向偏振分量通过光学系统后在出瞳处  $X$  方向偏振分量的相位改变量, 而  $\Phi_{xy}$  则表示的是入瞳处  $Y$  方向偏振分量通过光学系统后在出瞳处  $X$  方向偏振分量的相位改变量。这些参数在描述光线通过光学系统时, 其偏振特性的变化过程中起到了关键作用。对于折反式变形光学系统进行偏振光线追迹, 得到中心视场的琼斯瞳如图 10 所示。

图 10 中, 横轴表示出瞳面光瞳的  $x$  坐标, 纵轴表示出瞳面光瞳的  $y$  坐标。这些坐标都经过了

归一化处理。从琼斯瞳图中可以看出, 整体上变化幅度相对均匀, 但仍然存在一定程度的偏振像差。 $A_{xy}$  和  $A_{yx}$  的图像出现了马耳他十字 (Maltese cross), 与同轴系统表现相似。然而  $A_{xx}$  和  $A_{yy}$  的图像与同轴系统出现差异。此外,  $\Phi_{xy}$  与  $\Phi_{yx}$  呈现出相位突变, 这是因为在光线经过反射系数为零的点时相位会出现突变。

$A_{xx}$  最大幅值为 0.9163、最小值为 0.9149、平均为 0.9160,  $A_{yy}$  最大幅值为 0.9164、最小值为 0.9134、平均为 0.9156。从  $A_{xx}$  和  $A_{yy}$  数据结果来看, 同轴变形光学系统对于  $x$  偏振光和  $y$  偏振光的透过率相近。 $A_{xy}$  最大值为  $5.7 \times 10^{-3}$ 、平均值为  $1.98 \times 10^{-3}$ 。 $A_{yx}$  最大值为  $5.46 \times 10^{-3}$ 、平均值  $1.89 \times 10^{-3}$ 。 $A_{xy}$  和  $A_{yx}$  整体数值在  $10^{-3}$  量级。由于光线经过反射镜和透镜后会产生一定的能量损失, 所以  $A_{xx}$  和  $A_{yy}$  最大值均小于 1。 $A_{xx}$  和  $A_{yy}$  最大值、最小值以及平均值相近, 说明变形光学系统对于  $A_{xx}$  和  $A_{yy}$  的振幅影响较小。然而, 与之相反, 偏振串扰  $A_{xy}$  与  $A_{yx}$  的最大值和平均值均出现明显的差异, 说明了变形比为 1:2 的折反式变形光学系统对于偏振串扰存在一定的影响。



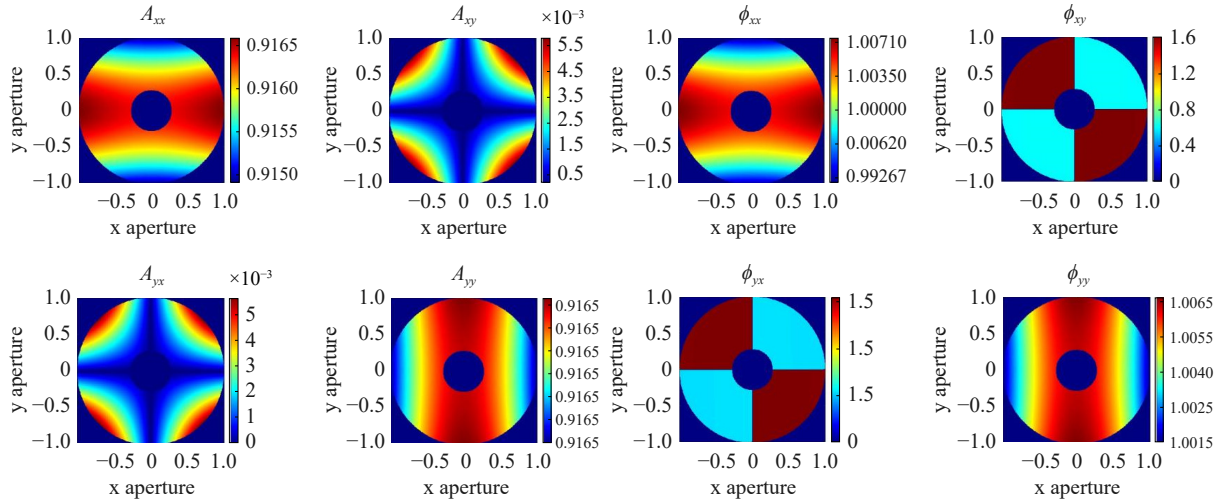


图 10 琼斯光瞳图。  $A_{xx}$ 、 $A_{xy}$ 、 $A_{yx}$ 、 $A_{yy}$  伪色图的值表示透过率； $\Phi_{xx}$ 、 $\Phi_{xy}$ 、 $\Phi_{yx}$ 、 $\Phi_{yy}$  伪色图的值表示相位变化量单位为  $\pi$  rad。

Fig. 10 Jones pupil. The values of  $A_{xx}$ ,  $A_{xy}$ ,  $A_{yx}$ ,  $A_{yy}$  denote the transmittance; the values of  $\Phi_{xx}$ ,  $\Phi_{xy}$ ,  $\Phi_{yx}$ ,  $\Phi_{yy}$  denote the phase change in units of  $\pi$  rad.

$$J = \begin{pmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{xx}e^{i\phi_{xx}} & A_{xy}e^{i\phi_{xy}} \\ A_{yx}e^{i\phi_{yx}} & A_{yy}e^{i\phi_{yy}} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

### 3.3 振幅响应矩阵

为了评估变形光学系统的偏振像差对成像的影响, 可以通过振幅响应函数矩阵 (Amplitude Response Matrix, ARM) 计算带有偏振像差的光学系统的像<sup>[18]</sup>。振幅响应矩阵 ARM 是通过对琼斯矩

阵  $J$  进行二维傅里叶变换得到的。

$$ARM(x, y) = \begin{pmatrix} \mathfrak{F}[J_{xx}(x, y)] & \mathfrak{F}[J_{xy}(x, y)] \\ \mathfrak{F}[J_{yx}(x, y)] & \mathfrak{F}[J_{yy}(x, y)] \end{pmatrix}, \quad (11)$$

将中心视场的琼斯矩阵带入 11 式计算, 其中  $\mathfrak{F}$  表示傅里叶变换  $J$  表示琼斯矩阵, 得到变形系统的振幅响应矩阵, 如图 11 所示。

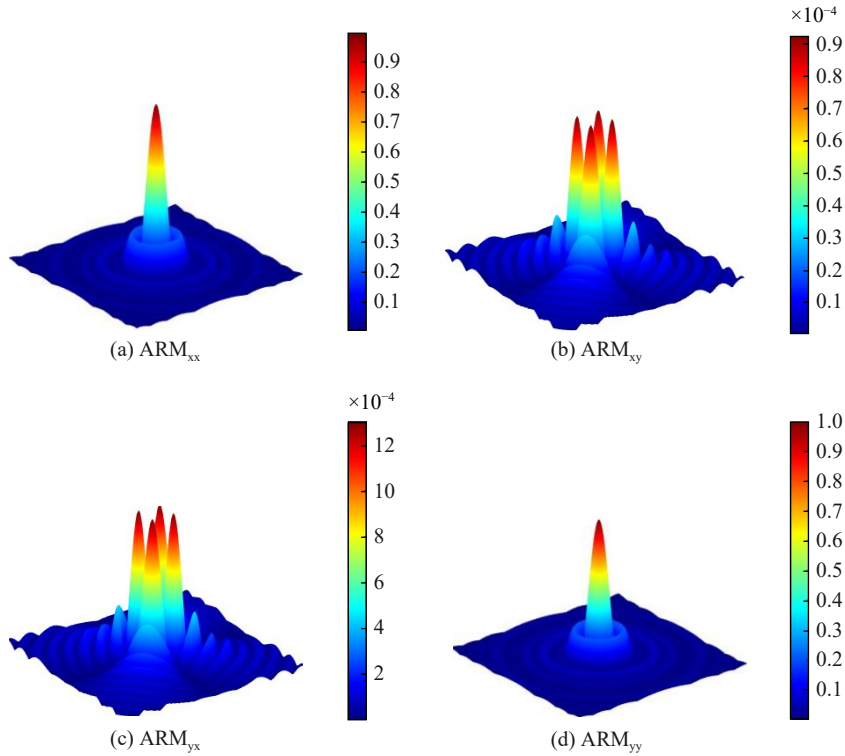


图 11 振幅响应矩阵

Fig. 11 Amplitude Response Matrix

$ARM_{xx}$ 、 $ARM_{yy}$  有一个峰, 这与同轴卡塞格林和离轴三反的结果相一致, 然而变形光学系统的  $ARM_{xy}$  和  $ARM_{yx}$  有四个峰值, 这是由于偏振像差引起的。将振幅以  $ARM_{yy}$  的最大值进行归一化处理。归一化后  $ARM_{xx}$  最大幅值为 0.9948、 $ARM_{yy}$  最大幅值为 1 非常接近, 但是仍然存在差异, 这是由于  $x$  和  $y$  方向结构不一致产生的。对角线方向偏振串扰  $ARM_{xy}$  最大幅值为  $9.3059 \times 10^{-4}$ 、 $ARM_{yx}$  最大幅值为  $1.3089 \times 10^{-3}$ ,  $ARM_{yx}$  幅

值是  $ARM_{yy}$  的 0.0013 倍。

### 3.4 点扩散函数

根据由 chipman 等人在 2015 年提出的偏振像差点扩散函数计算方法<sup>[18]</sup>, 计算得到在偏振像差影响下的变形光学系统点扩散函数, 并归一化处理。图 12(a) 为入射  $x$  线偏振光在  $x$  方向的点扩散函数, 图 12(b) 为入射  $x$  线偏振光耦合进  $y$  方向的点扩散函数。其中,  $I_{yx}$  的峰值为  $I_{xx}$  峰值的  $1.88 \times 10^{-6}$  倍, 这将引起一定程度的切趾效应。

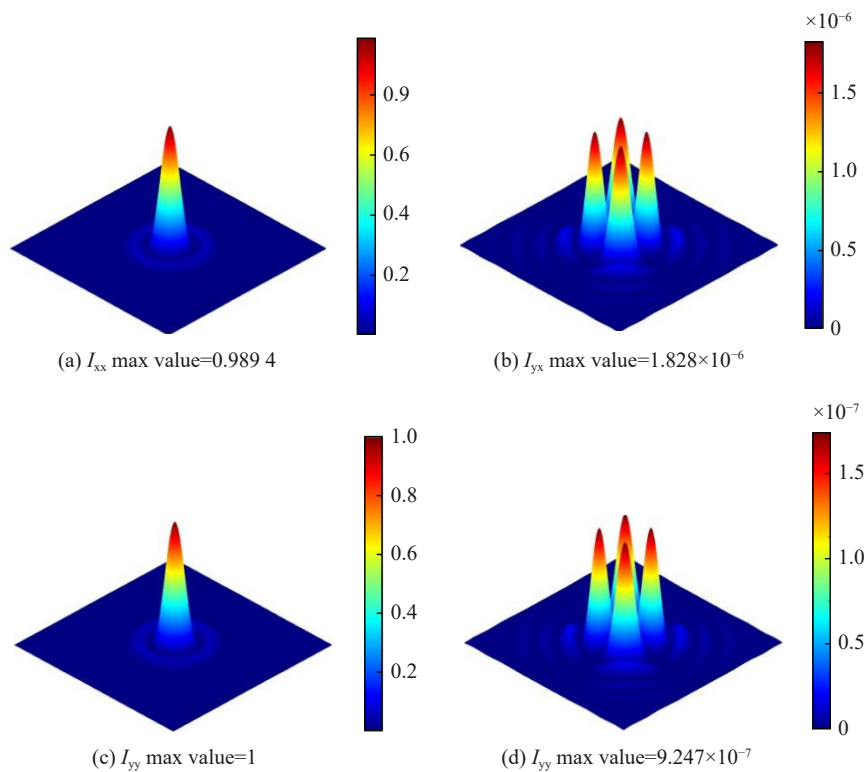


图 12 (a)  $I_{xx}$  点扩散函数; (b)  $I_{yx}$  点扩散函数; (c)  $I_{yy}$  点扩散函数; (d)  $I_{xy}$  点扩散函数。

Fig. 12 (a)  $I_{xx}$  PSF; (b)  $I_{yx}$  PSF; (c)  $I_{yy}$  PSF; (d)  $I_{xy}$  PSF.

选择  $I_{xx}$  和  $I_{yx}$  对角线方向进行截面分析并绘制图表, 如图 13(a) 所示。图中横坐标表示在像面上的位置, 单位为微米, 纵坐标则表示取  $\log_{10}$  下的光强值, 实线表示  $I_{xx}$ , 虚线表示  $I_{yx}$ 。从图中可以看出  $I_{xx}$  与  $I_{yx}$  并未完全重叠, 且  $I_{yx}$  零点与  $I_{xx}$  零点位置不同这将导致图像的对比度下降。

图 12(c) 为入射  $x$  线偏振光在  $x$  方向上的点扩散函数, 图 12(d) 为在  $y$  方向上的点扩散函数, 其中  $I_{xy}$  峰值为  $I_{yy}$  的  $9.24 \times 10^{-7}$  倍。选取  $I_{yy}$  和  $I_{xy}$  的 psf 对角线方向做切面并画图如图 13(b) 所示。

从图 12 的 psf 图像中可得到串扰项的最大

值存在差异, 分别取  $I_{xy}$  和  $I_{yx}$  串扰项的对角线数据画图。如图 14 所示,  $I_{yx}$  整体大于  $I_{xy}$ , 表明入射  $x$  方向偏振光引起的串扰能量大于入射  $y$  方向偏振光。在入射光为  $x$  线偏振光情况下,  $I_{xx}$  为信号光,  $I_{yx}$  为杂光, ghost psf 引起的对比度下降为  $3.7 \times 10^{-6}$ 。在入射光为  $y$  线偏振光情况下,  $I_{yy}$  为信号光,  $I_{xy}$  为杂光, ghost psf 引起的对比度下降为  $1.84 \times 10^{-6}$ 。这将对成像的对比度限制在  $10^{-6}$ 。偏振串扰又被称为鬼像 PSF(ghost PSF), 在一些要求对比度在  $10^{-8}$  的成像系统中优化鬼像 psf 变得非常重要

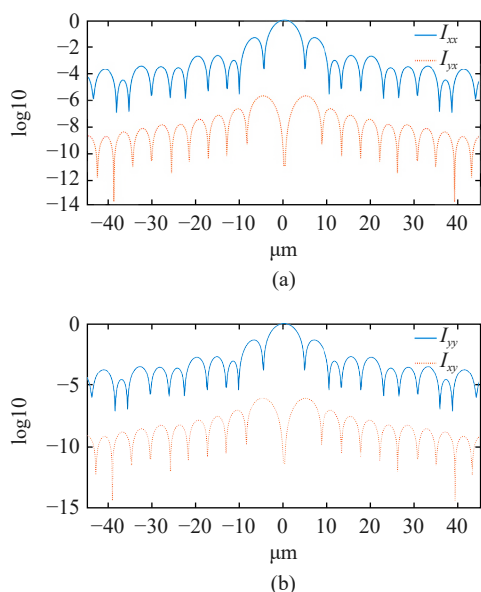


图 13 (a) 沿着  $I_{xx}$  和  $I_{yx}$  的 PSF 图像对角线方向做截面。实线和虚线分别表示  $I_{xx}$  和  $I_{yx}$ 。(b) 沿着  $I_{yy}$  和  $I_{xy}$  的 PSF 图像对角线方向做截面。实线和虚线分别表示  $I_{yy}$  和  $I_{xy}$ 。

Fig. 13 (a) cross-sections along the diagonal direction of the PSF images for  $I_{xx}$  and  $I_{yx}$ . The solid and dashed curves show  $I_{xx}$  and  $I_{yx}$ . (b) cross-sections along the diagonal direction of the PSF images for  $I_{yy}$  and  $I_{xy}$ . The solid and dashed curves show  $I_{yy}$  and  $I_{xy}$ .

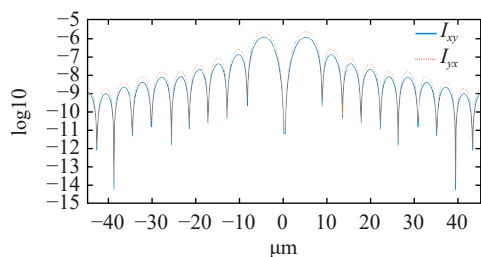


图 14 沿着  $I_{yy}$  和  $I_{yx}$  的 PSF 图像对角线方向做截面, 实线和虚线分别表示  $I_{yy}$  和  $I_{yx}$ 。

Fig. 14 cross-sections along the diagonal direction of the PSF images for  $I_{yy}$  and  $I_{yx}$ . The solid and dashed curves show  $I_{yy}$  and  $I_{yx}$ .

#### 参考文献:

- [1] CHIPMAN R, LAM W S T, YOUNG G. *Polarized Light and Optical Systems* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [2] CHIPMAN R A, LAM W S T, BRECKINRIDGE J. Polarization aberration in astronomical telescopes [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9613: 96130H.
- [3] BRECKINRIDGE J B, LAM W S T, CHIPMAN R A. Polarization aberrations in astronomical telescopes: the point spread function [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2015, 127(951): 445-468.
- [4] HE W J, FU Y G, LIU ZH Y, et al.. Three-dimensional polarization aberration functions in optical system based on three-dimensional polarization ray-tracing calculus [J]. *Optics Communications*, 2017, 387: 128-134.
- [5] 罗敬, 何煦, 范阔, 等. 无遮拦离轴天文望远镜偏振像差分析及其对光学畸变的影响 [J]. *光学学报*, 2020, 40(8):

## 4 结 论

本论文对折反式变形光学系统进行三维偏振光线追迹, 系统地分析了该系统的偏振像差及其对点扩散函数影响, 重点关注了镀有铝反射膜和增透膜的光学系统的偏振像差。通过计算, 获得了每个光学表面的二向衰减和相位延迟分布, 同时获得了光学系统的琼斯瞳和振幅响应矩阵。

计算得出的结果表明: 1、折反式变形光学系统的偏振像差和卡式系统存在较大差异, 由于变形系统在  $x$  方向和  $y$  方向的焦距不同导致了光学表面失去了二向衰减和相位延迟的中心对称性, 这也在琼斯瞳与振幅响应矩阵得到了体现; 2、在光学系统的六个光学表面中, 二向衰减和相位延迟的最大值均出现在次镜。在光学设计中, 通过增大主镜与次镜间隔, 从而减少入射角, 能在一定程度上降低偏振像差; 3、由于系统存在偏振像差使得振幅响应矩阵存在偏振串扰项, ghost psf 将导致系统对比度下降, 经计算对成像对比度的影响在  $10^{-6}$  量级。

在以后的研究中, 可以通过将偏振像差纳入自定义操作数的评价函数中, 进一步在光学设计中优化系统的面型和间距, 以降低偏振像差的影响。此外, 也可从光学镀膜设计的角度出发, 通过减少膜层周期数来降低界面的二向衰减和相位延迟, 并利用反射镜镀膜和透镜增透膜二向衰减符号相反的特性, 以实现相互补偿从而有效降低偏振像差的影响。

- 0811001.
- LUO J, HE X, FAN K, *et al.*. Polarization aberrations in an unobscured off-axis astronomical telescope and their effects on optics ellipticity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0811001. (in Chinese).
- [6] 张艺蓝, 史浩东, 王超, 等. 离轴自由曲面光学系统偏振像差特性研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(18): 1822002.
- ZHANG Y L, SHI H D, WANG CH, *et al.*. Research on polarization aberration characteristics of off-axis freeform surface optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(18): 1822002. (in Chinese).
- [7] LIU Y, LI Y Q, CAO ZH. Design of anamorphic magnification high-numerical aperture objective for extreme ultraviolet lithography by curvatures combination method[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(18): 4917-4923.
- [8] CHIPMAN R A. *Polarization aberrations* [D]. Tucson: The University of Arizona, 1987.
- [9] MCGUIRE J P, CHIPMAN R A. Polarization aberrations. 1. Rotationally symmetric optical systems[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(22): 5080-5100.
- [10] SASIÁN J. Polarization fields and wavefronts of two sheets for understanding polarization aberrations in optical imaging systems[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(3): 035102.
- [11] 杨宇飞, 颜昌翔, 胡春晖, 等. 相干激光通信光学系统偏振像差研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1106003.
- YANG Y F, YAN CH X, HU CH H, *et al.*. Polarization aberration analysis of coherent laser communication system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1106003.
- [12] 王凯凯, 王超, 史浩东, 等. 含数字微镜器件的离轴光学系统偏振像差分析及补偿[J]. *光学学报*, 2022, 42(16): 1611001.
- WANG K K, WANG CH, SHI H D, *et al.*. Polarization aberration analysis and compensation of off-axis optical system with digital micro-mirror device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(16): 1611001.
- [13] 吴庆, 史广维, 张建萍, 等. 折反式变形光学系统设计[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(6): 1376-1383.
- WU Q, SHI G W, ZHANG J P, *et al.*. Design of catadioptric anamorphic optical system[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(6): 1376-1383. (in Chinese).
- [14] 马迎军, 王晶, 洪永丰, 等. 道威棱镜的偏振特性及偏振补偿研究[J]. *中国光学(中英文)*, 2016, 9(1): 137-143.
- MA Y J, WANG J, HONG Y F, *et al.*. Polarization properties and polarization compensation of dove prism[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 137-143.
- [15] YUN G, CRABTREE K, CHIPMAN R A. Three-dimensional polarization ray-tracing calculus I: definition and diattenuation[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(18): 2855-2865.
- [16] BERNING P H. Theory and calculation of optical thin films[M]//HASS G. *Physics of Thin Films*. New York: Academic Press, 1963.
- [17] GEH B, RUOFF J, ZIMMERMANN J, *et al.*. The impact of projection lens polarization properties on lithographic process at hyper-NA[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6520: 65200F.
- [18] BRECKINRIDGE J B, LAM W S T, CHIPMAN R A. Polarization aberrations in astronomical telescopes: the point spread function[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2015, 127(951): 445-468. (查阅网上所有资料, 本条文献与第 3 条重复, 请确认).

#### 作者简介:

马士杰(1997—), 男, 福建龙岩人, 硕士研究生, 2020 年于福州大学获得理学学士学位, 主要从事光学系统设计理论与方法研究。E-mail: [mashijie211@mailsucas.ac.cn](mailto:mashijie211@mailsucas.ac.cn)