

含数字微镜器件的离轴光学系统偏振像差分析及补偿

王凯凯^{1,3}, 王超^{1,2,3*}, 史浩东¹, 刘壮¹, 付强¹, 王稼禹^{1,3}, 李英超¹, 姜会林¹¹长春理工大学吉林省空间光电技术重点实验室空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022;²中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;³长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 偏振像差会影响离轴光学成像系统的偏振测量精度和偏振成像效果,有必要对其进行标定和补偿。基于三维偏振光线追迹,分析了含有数字微镜器件(DMD)的编码超分辨离轴光学成像系统在不同视场下的偏振像差,并提出一种在光路中接近DMD位置加入线性衰减器(LD)和相位延迟器(LR)进行偏振补偿的方法。经计算发现,DMD表面引入的最大二向衰减为 1.43×10^{-3} ,最大相位延迟为 9.52×10^{-3} rad,整体光学系统引入的最大二向衰减为 2.32×10^{-3} ,最大相位延迟为 1.55×10^{-2} rad,DMD引入的偏振像差占全系统的60%以上。对比了偏振补偿前后整体光学系统的偏振像差分布、琼斯矩阵和偏振成像仿真效果,结果表明:布置合适的弱偏振器件进行补偿后,二向衰减和相位延迟均减小为补偿前的一半左右,琼斯矩阵接近单位阵,偏振成像中的串扰现象也明显减少。可见,DMD会引入较大的偏振像差,而在DMD附近的光路中使用LD和LR能够简单有效地进行偏振补偿。

关键词 成像系统; 偏振像差; 数字微镜器件; 琼斯矩阵; 弱偏振器件

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1611001

Polarization Aberration Analysis and Compensation of Off-Axis Optical System with Digital Micro-Mirror Device

Wang Kaikai^{1,3}, Wang Chao^{1,2,3*}, Shi Haodong¹, Liu Zhuang¹, Fu Qiang¹, Wang Jiayu^{1,3},
Li Yingchao¹, Jiang Huilin¹

¹National and Local Joint Engineering Research Center for Space Optoelectronics Technology, Jilin Key Laboratory of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

²State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;

³School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract Polarization aberration will affect the accuracy of polarization measurement and the polarization imaging effect of an off-axis optical imaging system, and thus it is necessary to calibrate and compensate for it. On the basis of three-dimensional polarization ray tracing, this study analyzes the polarization aberration of the coded super-resolution off-axis optical imaging system with a digital micro-mirror device (DMD) in different fields of view and proposes a method of polarization compensation by adding a linear attenuator (LD) and a linear retarder (LR) in the optical path near DMD. The calculations indicate that the maximum diattenuation and the maximum phase retardance introduced by the DMD surface are 1.43×10^{-3} and 9.52×10^{-3} rad, respectively, while the maximum diattenuation and the maximum phase retardance introduced by the overall optical system are 2.32×10^{-3} and 1.55×10^{-2} rad, respectively. Hence, the polarization aberration introduced by DMD accounts for more than 60% of that introduced by the whole system. Then, this paper

收稿日期: 2021-12-23; 修回日期: 2022-03-06; 录用日期: 2022-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(61805028, 61805027, 61705019, 61701045)、国家自然科学基金重大项目(61890960)、科工局专项(KJSP2016010202)、应用光学国家重点实验室开放基金(SKLA02020001A11)

通信作者: *nicklo19992009@163.com

compares the polarization aberration distributions, Jones pupils, and polarization imaging simulations of the overall optical system before and after polarization compensation. The results reveal that after an appropriate weak polarizer is used for compensation, the diattenuation and phase retardance are reduced by about a half, with the Jones matrix close to the unit matrix and the crosstalk phenomenon in polarization imaging alleviated significantly. It can be concluded that DMD introduces severe polarization aberration, but the utilization of the LD and LR in the optical path near DMD can simply and effectively compensate for the polarization.

Key words imaging systems; polarization aberration; digital micro-mirror device; Jones pupils; weak polarizer

1 引言

偏振像差用来表征光线经过光学系统后,其振幅、相位和偏振态的变化^[1]。当一束光非正入射到光学界面时,入射光的水平和垂直偏振分量的反射率不同,两者的振幅和相位出现差异^[2],从而改变光线的偏振态。光学系统的偏振像差与光学系统结构、光学界面的膜层有着密切的关系^[3-4]。

对于离轴成像光学系统,偏振像差对成像质量的影响往往不可忽略。Breckinridge 等^[5]研究了偏振像差对望远镜点扩展函数(PSF)的影响;英国国家基础设施委员会联合多国成立的偏振光学研究团队分析了 30 m 望远镜(TMT)的偏振像差^[6];Chipman 团队^[7]对晶体、单轴材料部件、液晶器件等进行了偏振像差分析;He 等^[8-9]讨论了偏振像差对偏振检测精度的影响;Shang 等^[10-11]研究了光刻物镜中的偏振像差,并给出了系统成像分辨率的提升措施;罗敬等^[12-14]通过仿真对比分析了同轴望远系统与离轴望远系统的偏振像差及其对 PSF 椭圆率的影响;张艺蓝等^[15]研究了离轴自由曲面光学系统的偏振像差特性;贾文涛等^[16]对偏振激光雷达中的偏振像差进行了分析和校正;徐百威等^[17]分析了偏振色差对自适应光学系统校正能力的影响。

数字微镜器件(DMD)是一种反射式空间光调制器,具有分辨率高、响应速度快等特点^[18],在计算成像领域应用广泛,可用于快照式光谱成像、编码超分辨成像等^[19-22]。DMD 由多个二维铝反射镜组成,当光线入射其上,不同微镜上光线的入射角不同^[23],带来特殊的偏振误差,且由于 DMD 的整个光路属于离轴光学系统,为了利用计算光学成像系统精确获取偏振图像信息,必须对 DMD 引入的偏振像差进行分析和建模。

本文基于偏振光线追迹,系统地分析了典型视场条件下焦平面编码超分辨成像光学系统中的 DMD 表面以及整个系统的总体偏振像差分布情况。针对偏振像差最大的视场点,提出了使用弱偏振器件对 DMD 表面偏振像差进行补偿的方法,分析了补偿后整体光学系统的琼斯瞳,最后进行了偏振成像仿真,并评价了成像质量。

2 编码超分辨成像光学系统结构

已设计好的基于 DMD 的焦平面编码超分辨偏振成像光学系统如图 1 所示,工作波长为中波红外,该光学系统由自由曲面 FM1 和 DMD、自由曲面 FM2、自由曲面 FM3、中波红外微偏振阵列焦平面探测器等 5

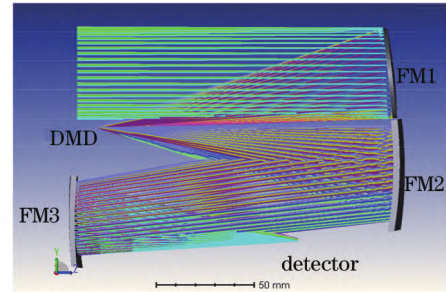


图 1 光学系统结构图

Fig. 1 Optical system structure diagram

部分组成。FM1 将中间像成到 DMD 处,经 DMD 编码调制后通过自由曲面投影系统最终成像在中波红外偏振探测器上。其中中波红外探测器上附着有交错排布的 4 个偏振方向的微偏振片阵列,同时得到红外和偏振图像信息。光学系统的总体参数如表 1 所示,光学系统的调制传递函数(MTF)如图 2 所示。

表 1 光学系统参数

Table 1 Parameters of optical system

Parameter	Value
Wavelength / μm	3.7-4.8
Field of view in x direction / $^\circ$	4.23
Field of view in y direction / $^\circ$	3.38
F number	2.25
Focal length /mm	147
DMD array size /pixel	1280 $\times$ 1024
DMD pixel size / μm	10.8
Detector pixel size / μm	17
Detector array size /pixel	640 $\times$ 512
Dynamic range of detector /dB	29

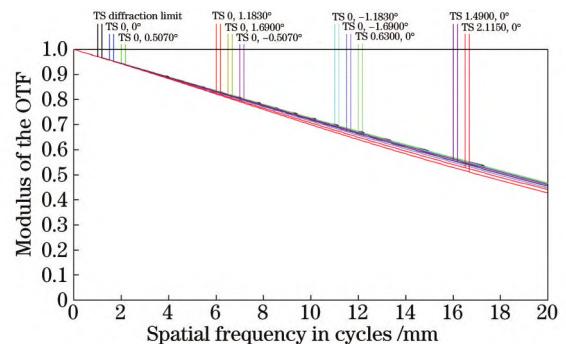


图 2 MTF 图

Fig. 2 MTF diagram

后续将以本系统为例,对 DMD 面上和系统总体产生的偏振像差分布情况、系统的琼斯瞳,以及系统偏振成像效果进行仿真分析。

3 DMD 及全系统偏振像差模型

3.1 偏振像差分类

像差描述了出瞳处波前与理想均匀振幅、均匀偏振态球面之间的偏差,主要分为波像差、切趾像差和偏振像差^[24],本文主要研究偏振像差。偏振像差又分为二向衰减和相位延迟等,主要来自光线在光学表面的非正入射。根据斯涅耳定理,光线倾斜入射到镜面并发生反射时,s 光(垂直于入射面分量)与 p 光(平行于入射面分量)的反射系数分别为

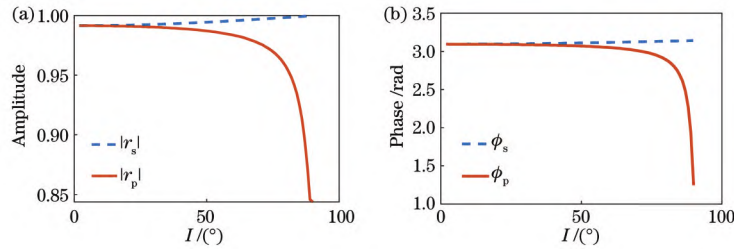


图 3 r_s 、 r_p 的振幅和相位反射系数随入射角的变化曲线。(a) 振幅反射系数; (b) 相位反射系数

Fig. 3 Variations of amplitude and phase reflection coefficients for r_s and r_p with incident angle. (a) Amplitude reflection coefficient; (b) phase reflection coefficient

二向衰减表征了光学系统的透射率对入射光偏振态的选择性,定义为

$$D = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}} = \frac{\left| |r_s|^2 - |r_p|^2 \right|}{\left| |r_s|^2 + |r_p|^2 \right|}, \quad (2)$$

式中: $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 分别为光学系统的最大和最小透射光强。

相位延迟表征了本征偏振态之间的相位差,可定义为

$$\delta = \phi_{\max} - \phi_{\min} = |\phi_s - \phi_p|, \quad (3)$$

式中: $\phi_{\max}$ 、 $\phi_{\min}$ 分别为光学系统最大、最小本征偏振态的相位。在计算相位延迟时,需要剔除因局部坐标变换引入的附加相位^[26-27]。

3.2 偏振像差模型建立

传统的偏振光线追迹是基于二维琼斯矩阵实现的^[28-29],当系统为离轴式时,二维偏振光追迹无法准确描述系统的偏振像差^[26-27]。这时引入光线的传播矢量 $\mathbf{k}$,将二维琼斯矩阵拓展成三维琼斯矩阵,并对系统进行三维偏振光线追迹。

在本系统中,DMD 面与系统的一次焦面重合,用于引入编码调制信息,以便于后续重建高分辨率图像。DMD 表面的入射与反射光线如图 4 所示,坐标轴原点位于入瞳中心。入射光线的传播矢量为 $\mathbf{k}_{q-1}$ (下标 q 表示光学界面在光学系统中的序号),出射光线传播矢量

$$\begin{cases} r_p = \frac{n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} = |r_p| \exp(i\phi_p) \\ r_s = \frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} = |r_s| \exp(i\phi_s) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: r_p 是 p 光的反射系数; r_s 是 s 光的反射系数; n 代表反射镜折射率; θ 为入射角; ϕ_p 、 ϕ_s 分别表示 p 光和 s 光的相位反射系数; $|r_p|$ 、 $|r_s|$ 分别表示 p 光和 s 光的振幅反射系数。

本系统中各反射面均镀铝膜,以中波红外的 4250 nm 中心波长进行分析,此时铝的复折射率为 $7.35 + 40.83i$ ^[25],s 光和 p 光的反射系数 r_s 、 r_p 会随着光线的入射角度 I 的变化而变化,如图 3 所示。

为 $\mathbf{k}_q$ 。相对应的 s 和 p 分量分别为 s_{q-1} 和 p_{q-1} ; s_q 、 p_q 、 s 、 p 、 $\mathbf{k}$ 满足右手坐标系。值得注意的是,由于 DMD 位于系统的一次焦面,来自不同光瞳和视场坐标的光线入射到 DMD 上的角度各不相同,也会各自引入不同大小和方向的偏振像差。

设任意光线在光瞳上的坐标为 (d_x, d_y) ,入射在 DMD 上某点,该点的投影坐标为 (h_x, h_y) 。如图 4 所示,实际使用 DMD 时,每个微镜是绕自身对角线 L 进行偏转,实现开关状态,DMD 的背板和探测器靶面有 45° 的夹角。DMD 处于开状态时,微镜绕 L 顺时针旋转 12° ;处于关状态时,微镜绕 L 逆时针旋转 12° ,此时该微镜上的光线不会进入探测器。这里仅研究微镜全部处于开状态导致偏振像差最大的情况。DMD 上任一微镜的法线在全局坐标系下可表示为

$$\mathbf{n}_{\text{DMD}} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: $n_x = \cos 102^\circ$, $n_y = \cos 90^\circ$, $n_z = \cos 12^\circ$ 。光线在该微反射镜上反射时,光线传播方向的变换矩阵^[30]为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 - 2n_x^2 & -2n_x n_y & -2n_x n_z \\ -2n_x n_y & 1 - 2n_y^2 & -2n_y n_z \\ -2n_x n_z & -2n_y n_z & 1 - 2n_z^2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

如图 4 所示,望远物镜的焦距为 f ,则入射在 DMD 微反射镜的光矢量 $\mathbf{k}_{q-1}$ 可表示为

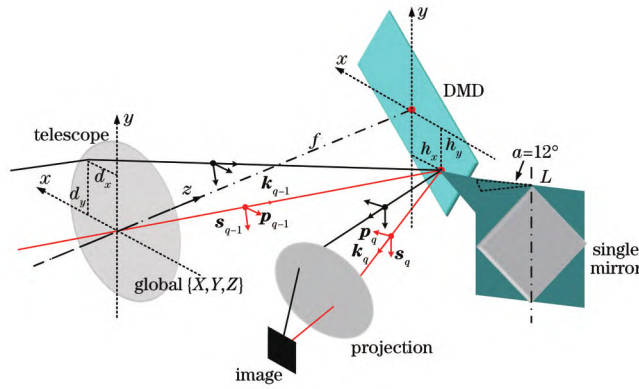


图 4 DMD 表面偏振光反射示意图

Fig. 4 Schematic diagram of polarized light reflection on surface of DMD

$$k_{q-1} = \begin{bmatrix} \frac{h_x - d_x}{\sqrt{(h_x - d_x)^2 + (h_y - d_y)^2 + f^2}} \\ \frac{h_y - d_y}{\sqrt{(h_x - d_x)^2 + (h_y - d_y)^2 + f^2}} \\ f \\ \frac{1}{\sqrt{(h_x - d_x)^2 + (h_y - d_y)^2 + f^2}} \end{bmatrix} \circ \quad (6)$$

经 DMD 平面反射后, 光束出射的传播矢量为

$$k_q = H \cdot k_{q-1} \quad (7)$$

入射光分量 s_{q-1}, p_{q-1} 与出射光分量 s_q, p_q 在全局坐标系下可表示为

$$\begin{cases} s_{q-1} = \frac{k_{q-1} \times k_q}{|k_{q-1} \times k_q|} \\ p_{q-1} = k_{q-1} \times s_q \\ s_q = s_{q-1} \\ p_q = k_q \times s_q \end{cases} \quad (8)$$

光线入射在 DMD 微反射镜上时入射角 θ 可表示为

$$\theta = \cos \langle k_{q-1}, n_{\text{DMD}} \rangle = \frac{n_x \cdot (h_x - d_x) + n_y \cdot (h_y - d_y) + n_z \cdot f}{\sqrt{(h_x - d_x)^2 + (h_y - d_y)^2 + f^2} \cdot \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \quad (9)$$

将式(9)代入式(1)后, 光线在 DMD 面上反射时 s

光与 p 光的反射系数 r_s, r_p 便只与视场和光瞳坐标有关。

根据三维偏振光线追迹的定义, 当某个视场和光瞳坐标下的光线在 DMD 上反射时, 光线的偏振态变化可以由偏振变换矩阵 P 表示:

$$P = \begin{pmatrix} s_{x,q} & p_{x,q} & k_{x,q} \\ s_{y,q} & p_{y,q} & k_{y,q} \\ s_{z,q} & p_{z,q} & k_{z,q} \end{pmatrix} J \begin{pmatrix} s_{x,q-1} & s_{y,q-1} & s_{z,q-1} \\ p_{x,q-1} & p_{y,q-1} & p_{z,q-1} \\ k_{x,q-1} & k_{y,q-1} & k_{z,q-1} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

式中: $s_{x,q}, s_{y,q}, s_{z,q}$ 矢量分别代表出射光 s 矢量在三个坐标系上的矢量分量; $s_{x,q-1}, s_{y,q-1}, s_{z,q-1}$ 代表入射光矢量在三个坐标系上的矢量分量, 其他带有下标的 p, k 矢量以此类推; J 表示光线在 DMD 表面反射时的三维琼斯矩阵, 可表示为

$$J = \begin{pmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

根据式(6)~(9), 式(10)中的入射和出射光的各矢量分量, 以及光线在 DMD 表面反射时的偏振反射系数 r_s, r_p 均是以视场和光瞳坐标为自变量的函数。

在全局坐标系中, DMD 上出射光的偏振态 E_{out} 可由偏振变换矩阵 P 和入射光偏振态 E_{in} 表征, 即

$$E_{\text{out}} = P \cdot E_{\text{in}} \quad (12)$$

对偏振变换矩阵 P 进行奇异值分解, 得到入射到 DMD 面上光线的本征偏振态:

$$P = UDV^\dagger = \begin{pmatrix} k_{x,q} & u_{x,1} & u_{x,2} \\ k_{y,q} & u_{y,1} & u_{y,2} \\ k_{z,q} & u_{z,1} & u_{z,2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_1 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_{x,q-1} & k_{y,q-1} & k_{z,q-1} \\ v_{x,1} & v_{y,1} & v_{z,1} \\ v_{x,2} & v_{y,2} & v_{z,2} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

式中: U, V 为酉矩阵; D 为对角矩阵; $V^\dagger$ 为 V 的共轭转置矩阵。可见, P 被分解成两个酉矩阵 U, V 和一个对角矩阵 D , 从而得到偏振变换矩阵的特征值 (λ_1, λ_2)、入射光的本征偏振态 (v_1, v_2) 和出射光的本征偏振态 (u_1, u_2)。根据式(2)、(3), 即可计算出 DMD 表面的二向衰减和相位延迟的大小和方向。

同样的方法也可以用于分析整体光学系统的偏振像差。系统整体的偏振变换矩阵可表示为

$$P_{\text{total}} = \prod_{q=1}^Q P_q, \quad (14)$$

式中: P_q 表示第 q 个界面的偏振变换矩阵, 其定义与 DMD 面上的偏振变换矩阵一致; Q 表示光学系统中光

学界面的总数。对 P_{total} 进行奇异值分解,即可得到系统出瞳处和入瞳处的本征偏振态,从而计算出系统偏振像差。

3.3 DMD 表面及全系统偏振像差分布

通过 3.2 节的分析,DMD 表面产生的偏振像差与视场和光瞳坐标有着密切关系。在本系统中所使用的波长和金属材质的条件下,偏振像差随着入射角的增大而增大^[31]。DMD 由 1280×1024 个微镜组成,每个微镜对应焦平面不同的视场点,利用 ZEMAX 软件的光线追迹功能,建立了系统中各个微镜上主光线的入射角随视场变化的趋势图,如图 5 所示。边缘光线与主光线入射角变化趋势一致。

从图 5 中可以看出,DMD 表面光线的入射角最大和最小位置分别对应如图 1 所示的离轴四反光学系统中的归一化视场 $(1, -1)$ 、 $(-1, 1)$ 。对于每一视场点,在光学系统入瞳处对光线在径向及轴向均匀采样,从而计算 DMD 面以及全系统的二向衰减和相位延迟。为了更加直观地研究像差的分布情况,图 6、7 中给出了两个典型视场点下 DMD 面和系统出瞳面处产生的

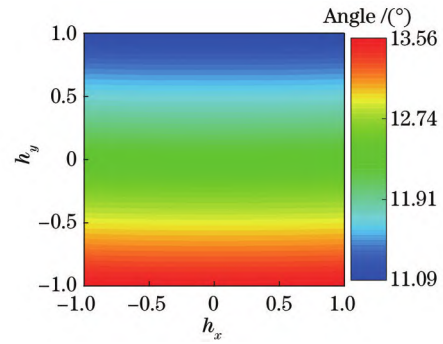


图 5 DMD 表面光线入射角随视场的变化趋势
Fig. 5 Variation trend of incident angle of light on DMD surface with fields of view

总体偏振像差的大小与方向。其中,横纵坐标表示归一化的光瞳坐标,线段长度表示二向衰减或相位延迟的大小,线段方向分别对应具有最大振幅透射率或最小相位改变时入射光的偏振方向。计算相位延迟时已剔除了光学系统中不同面的几何坐标变换引起的相位延迟量(单位是 rad)。

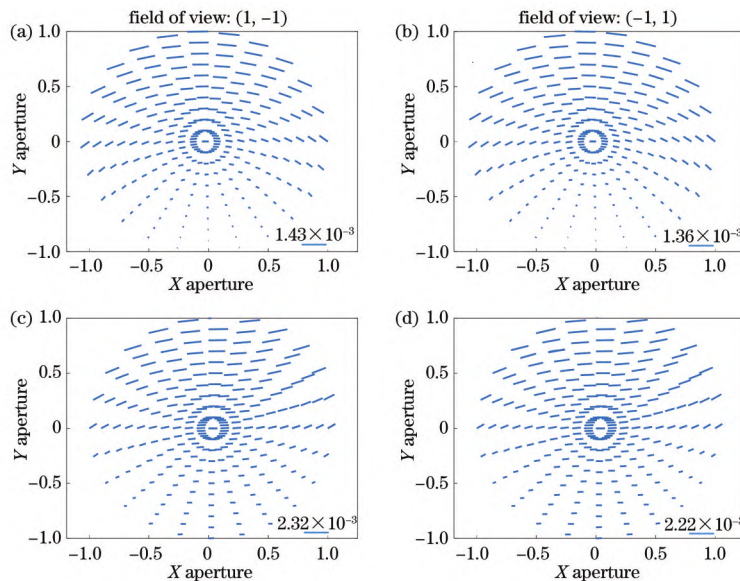


图 6 $(1, -1)$ 和 $(-1, 1)$ 视场的 DMD 表面和全系统二向衰减。(a)(b) DMD 表面二向衰减;(c)(d)全系统二向衰减
Fig. 6 Diattenuation of DMD surface and total system in fields of view of $(1, -1)$ and $(-1, 1)$. (a)(b) Diattenuation of DMD surface; (c)(d) diattenuation of total system

从图 6、图 7 所示的二向衰减和相位延迟图来看,由于本系统为离轴反射系统,DMD 表面与系统总体的偏振像差均失去了同轴光学系统的旋转对称性^[12]。表 2 为典型视场 DMD 表面与出瞳处二向衰减和相位延迟最大值。

通过分析发现,无论是哪一个视场点,DMD 表面均贡献了系统大部分的二向衰减和相位延迟量。这是由于 DMD 表面作为系统的一次像面,光线在其上的入射角大于其他 3 个自由曲面反射镜的光线入射角,从而产生了较大的偏振像差。偏振像差除了影响通过光学系统的光束的偏振度、偏振角之外,还会使入射光

表 2 典型视场 DMD 表面与出瞳处二向衰减和相位延迟最大值
Table 2 Maximum values of diattenuation and retardance at DMD surface and exit pupil in typical fields of view

Surface	Maximum diattenuation / 10^{-3}		Maximum retardance / (10^{-3} rad)	
	$(1, -1)$	$(-1, 1)$	$(1, -1)$	$(-1, 1)$
DMD	1.43	1.36	9.52	9.05
Exit pupil	2.32	2.22	15.5	14.7

的部分能量耦合至正交偏振态,造成偏振串扰,导致成像系统成像质量的下降。

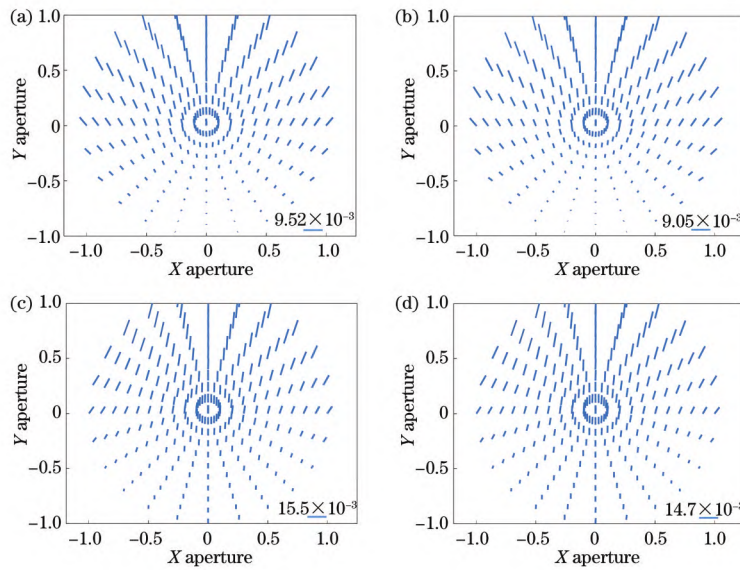


图 7 (1, -1)和(-1, 1)视场的DMD表面和全系统相位延迟。(a)(b) DMD表面相位延迟;(c)(d)全系统相位延迟
Fig. 7 Retardance of DMD surface and total system in fields of view of (1, -1) and (-1, 1). (a)(b) Retardance of DMD surface; (c)(d) retardance of total system

4 偏振像差补偿方法

减小光学系统偏振像差的方法有很多,如减小光线入射角度、通过镀膜进行补偿、使用偏振器件进行补偿等。在尽量不改变光学系统的前提下,考虑使用偏

振器件进行补偿。使用较易获得的弱偏振器件,包括线性衰减器(LD)和相位延迟器(LR)。这两个器件放置于接近DMD处,与光学系统零视场主光线垂直,如图8所示。此时入射到偏振器件上的光线口径较小,从而减小器件的尺寸。

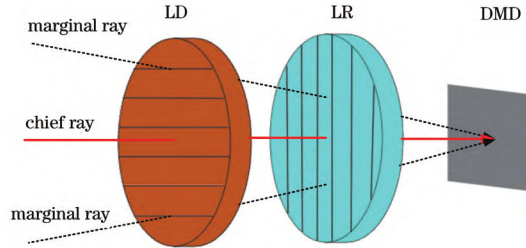


图 8 补偿器件放置示意图
Fig. 8 Schematic diagram of compensation device setting

LD的琼斯矩阵可表示为

$$J_{LD} = \begin{pmatrix} t_{\max} & 0 \\ 0 & t_{\min} \end{pmatrix}, \quad (15)$$

式中: $t_{\max}$ 为器件的最大透过率; $t_{\min}$ 为器件的最小透过率。

LR的两组正交偏振态的相位 $\delta/2$ 互为相反数,其琼斯矩阵可表示为

$$J_{LR} = \begin{pmatrix} \exp(-i\delta/2) & 0 \\ 0 & \exp(i\delta/2) \end{pmatrix}. \quad (16)$$

针对偏振像差最大的视场点(1, -1)来设计LD和LR的参数,使该视场点偏振像差减小至最小。LD的本征透过率 $t_{\max}$ 与 $t_{\min}$ 与LR引入的相位延迟量 δ_{LR} ^[32]可分别表示为

$$\begin{cases} t_{\max} = \frac{2\cos\theta_i}{\cos\theta_i + n_{LD}\cos\theta_t} \\ t_{\min} = \frac{2\cos\theta_i}{n_{LD}\cos\theta_i + \cos\theta_t} \end{cases}, \quad (17)$$

$$\delta_{LR} = \frac{2\pi}{\lambda} |n_e - n_o| d, \quad (18)$$

式中: θ_i, θ_t 分别表示入射角和出射角; n_{LD} 表示LD的折射率; λ 表示波长; n_e, n_o 分别表示e光和o光的折射率; d 表示晶体厚度。上述除 d 外的参量都与波长有关,因此有必要分析不同波长条件下LD和LR的参数及适用性。这里选择 $4.25\ \mu\text{m}$ 中心波长时折射率 $n_{LD}=2.8023$ 的红外玻璃材料作为LD,折射率 $n_{LR}=1.3455$ 的 MgF_2 晶体作为LR,根据DMD面上偏振像差大小和方向,选择合适的角度放置二者。分析偏振像差的瞳分布情况,结果如图9、10所示。

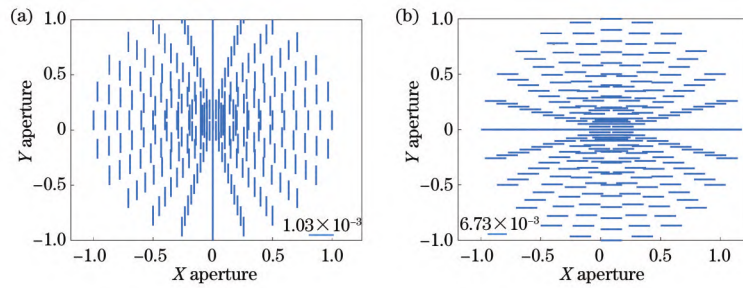


图 9 弱偏振器件的偏振像差分布图。(a) LD 二向衰减;(b) LR 相位延迟

Fig. 9 Polarization aberration distributions of weak polarizer. (a) Diattenuation of LD; (b) retardance of LR

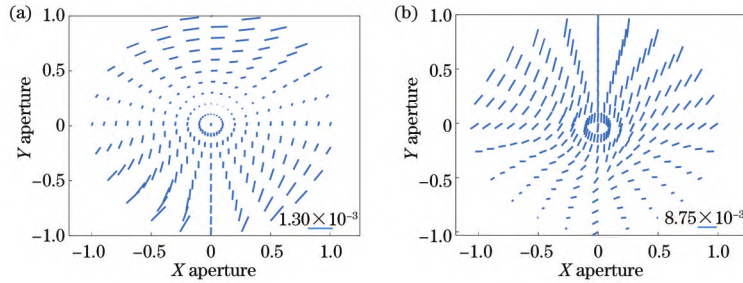


图 10 经 LD、LR 补偿后的系统偏振像差分布图。(a) 二向衰减;(b) 相位延迟

Fig. 10 System polarization aberration distributions after LD and LR compensations. (a) Diattenuation; (b) retardance

分析了不同波长条件下补偿前后系统的偏振像差值大小,如表 3 所示。

表 3 不同波长条件下补偿前后系统的偏振像差值

Table 3 Polarization aberrations of system before and after compensation under different wavelengths

Wavelength / μm	Maximum diattenuation / 10^{-3}		Maximum retardance / (10^{-3} rad)	
	Original	Corrected	Original	Corrected
3.7	2.85	1.40	22.10	11.20
4.25	2.32	1.30	15.50	8.75
4.8	1.92	0.97	9.72	4.92

从以上分析可以看出,在 DMD 前布置两偏振器件后,系统总体的偏振像差有了明显改善,减小为未放置偏振补偿器件前的一半左右。

5 系统的琼斯瞳表示

第 3 节中介绍的三维偏振追迹方法可以在全局坐标系下描述偏振光,提高了计算的准确性,但是在三维坐标系下无法直观地描述出射光与入射光偏振态变化的关系。为了解决这一问题,还需将三维偏振追迹矩阵 $\mathbf{P}_{\text{total}}$ 变换至出瞳处局部坐标系下,得到系统的琼斯矩阵。某一物点不同光瞳坐标的一组琼斯矩阵称为琼斯瞳,其表现形式为琼斯矩阵在出瞳处的映射^[33]。物体空间单个点的琼斯矩阵为

$$\mathbf{J}_{\text{Jones}} = \begin{pmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{xx} \exp(i\phi_{xx}) & A_{xy} \exp(i\phi_{xy}) \\ A_{yx} \exp(i\phi_{yx}) & A_{yy} \exp(i\phi_{yy}) \end{pmatrix}, \quad (19)$$

式中: A_{xx} 表示出瞳处某光线相对于该光线在入瞳时 x 偏振分量的振幅变化; A_{xy} 表示某光线在出瞳处出射时 y 偏振分量转变为 x 偏振分量的振幅; ϕ_{xx} 表示某光线在出瞳处出射时 x 偏振分量相对于该光线在入瞳时 x 偏振分量的相位改变量; ϕ_{xy} 表示某光线在出瞳处出射时 x 偏振分量相对于入射时 y 偏振分量的相位改变量。

对图 1 所示的系统偏振像差最大的 (1, -1) 视场进行了三维偏振光线追迹,追迹所得的琼斯瞳结果如图 11 所示。其中各个子图中的横、纵坐标表示归一化的出瞳坐标。从各个子图中可以看出, A_{xx} 与 A_{yy} 平均值大于 1, A_{xy} 与 A_{yx} 平均值不为 0, 说明光学系统不仅存在偏振像差,还存在偏振串扰。从图 11(d)、(g) 可以看出,相位延迟 ϕ_{xy} 与 ϕ_{yx} 变化剧烈且不连续,这是由于当反射系数等于 0 时,其相位发生 π 的变化^[5]。由于本系统属于离轴多反射镜系统,同轴系统特有的 Maltese cross 的十字花图样并未出现^[7]。

对包含 LD 和 LR 的补偿后全系统的 6 个光学界面进行三维偏振光追迹,系统的琼斯瞳如图 12 所示。

对比图 11 和图 12 各个子图,可以看出,图 12 中的 A_{xx} 和 A_{yy} 整体更接近 1, A_{xy} 、 A_{yx} 及相位 ϕ_{xx} 、 ϕ_{yy} 也更接近 0, 说明补偿后系统的琼斯瞳更接近单位阵。这再次证明了使用 LD 和 LR 组合的方式可简单快捷地减小系统的偏振像差。

6 系统偏振成像仿真

为了直观地展示进行偏振补偿前后系统的成像质量,进行了全系统偏振成像仿真。非相干光源照明条件下成像系统的偏振分布可以由 4×4 的点扩散矩阵 (PSM) $\mathbf{M}_{\text{PS}}$ 表示^[34]。传统的光学传递函数 (OTF) 将成

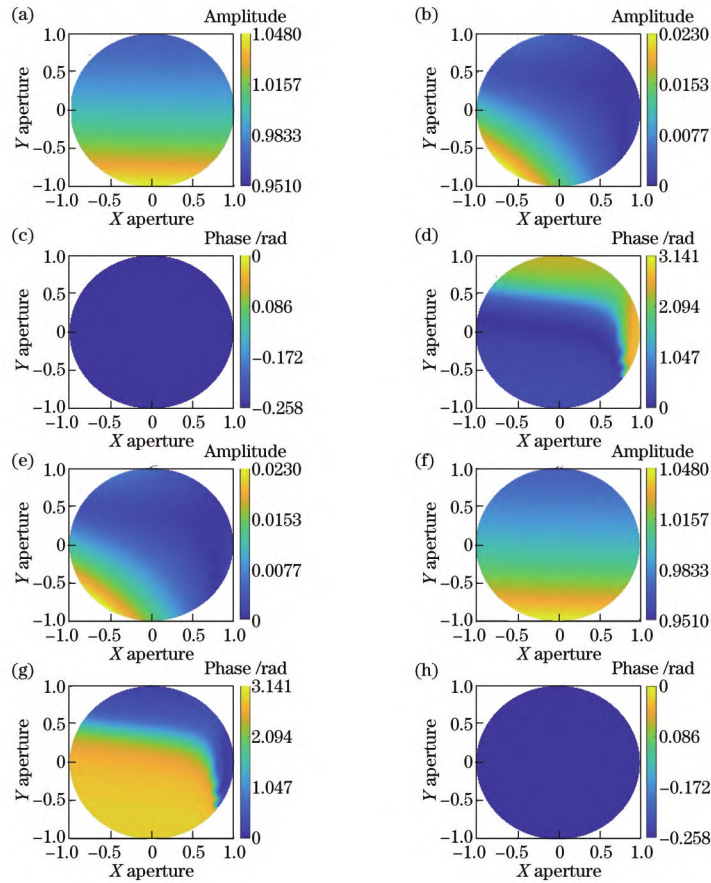


图 11 琼斯瞳图。(a) A_{xx} ; (b) A_{xy} ; (c) ϕ_{xx} ; (d) ϕ_{xy} ; (e) A_{yx} ; (f) A_{yy} ; (g) ϕ_{yx} ; (h) ϕ_{yy}
Fig. 11 Jones pupils. (a) A_{xx} ; (b) A_{xy} ; (c) ϕ_{xx} ; (d) ϕ_{xy} ; (e) A_{yx} ; (f) A_{yy} ; (g) ϕ_{yx} ; (h) ϕ_{yy}

像描述为一种空间滤波过程,一般来说,成像系统能够准确地对图像中的低频部分进行成像,而较高的空间频率可能被衰减。为了评估带有偏振像差的光学系统整体的成像质量,引入光学传递矩阵 M_{OT} ,它是通过 M_{PS} 进行傅里叶变换得到的。像方 Stokes 矢量的傅里叶变换等于光学系统的 M_{OT} 乘以物方 Stokes 矢量的傅里叶变换:

$$\mathfrak{F} \begin{pmatrix} S_{0, \text{image}} \\ S_{1, \text{image}} \\ S_{2, \text{image}} \\ S_{3, \text{image}} \end{pmatrix} = M_{OT} \cdot \mathfrak{F} \begin{pmatrix} S_{0, \text{object}} \\ S_{1, \text{object}} \\ S_{2, \text{object}} \\ S_{3, \text{object}} \end{pmatrix}, \quad (20)$$

式中: $\mathfrak{F}$ 代表傅里叶变换; $S_{m, \text{object}}$ ($m=0, 1, 2, 3$) 表示物体的 Stokes 矢量; $S_{m, \text{image}}$ 表示图像的 Stokes 矢量。

然后对式(20)等号左边进行傅里叶逆变换,即可得到像方空间 Stokes 矢量图像。中心波长下水平线偏振靶标经整个光学系统成像后的仿真效果如图 13 所示。

物体的 Stokes 矢量强度如图 13 中 $S_{m, \text{object}}$ ($m=0, 1, 2, 3$) 所示,图 13 中的 $S_{m, \text{image1}}$, $S_{m, \text{image2}}$ ($m=0, 1, 2, 3$) 分别表示线偏振光靶标经补偿前和补偿后像方空间的图像强度值。可以看出,光线经过光学系统后,像面重构的 Stokes 矢量图像都有不同程度边缘模糊的情况,这是由于高频时光学系统调制传递函数值较小,高频信息丢失。并且在对 S_0 、 S_2 和 S_3 分量成像时, $S_{1, \text{object}}$ 分量

空间频率的串扰导致重构的 $S_{0, \text{image1}}$ 、 $S_{2, \text{image1}}$ 和 $S_{3, \text{image1}}$ 图像强度值也出现了明暗相间的条纹,这与第 5 节中系统琼斯瞳对偏振串扰的预测相吻合,说明在使用补偿前的本系统进行偏振成像时,系统的偏振像差会显著影响偏振信息精度,造成偏振测量误差。为了分析不同波长条件下系统偏振串扰对偏振信息获取精度的影响和偏振补偿方案的适用性,还对各个波长时系统获取偏振信息的情况进行了分析,结果如表 4 所示。

以中心波长为例,加入偏振补偿器件前, $S_{0, \text{image1}}$ 、 $S_{2, \text{image1}}$ 和 $S_{3, \text{image1}}$ 的理想强度分别为 1, 0, 0, 由于 $S_{1, \text{object}}$ 的串扰, $S_{0, \text{image1}}$ 、 $S_{2, \text{image1}}$ 和 $S_{3, \text{image1}}$ 的实际强度分别变为 0.978, 0.036, 0.021。加入偏振补偿器件后, $S_{0, \text{image2}}$ 、 $S_{2, \text{image2}}$ 和 $S_{3, \text{image2}}$ 图像强度分别变为 0.996, 0.014, 0.001。进行偏振补偿后,系统 S_0 、 S_2 与 S_3 偏振信息获取精度分别提升了 1.8%, 2.2%, 2.0%, 其他波长条件下的补偿结果与中心波长的补偿结果大同小异,说明提出的偏振补偿方法取得了良好的效果。

7 结 论

构建了 DMD 的偏振三维像差理论模型,针对含有 DMD 的编码超分辨离轴反射式光学系统,采用基于 ZEMAX 的三维光线追迹的方法计算了典型视场条件下 DMD 表面及整体光学系统的偏振像差分布,指出 DMD 引入的二向衰减和相位延迟分别占系统总的

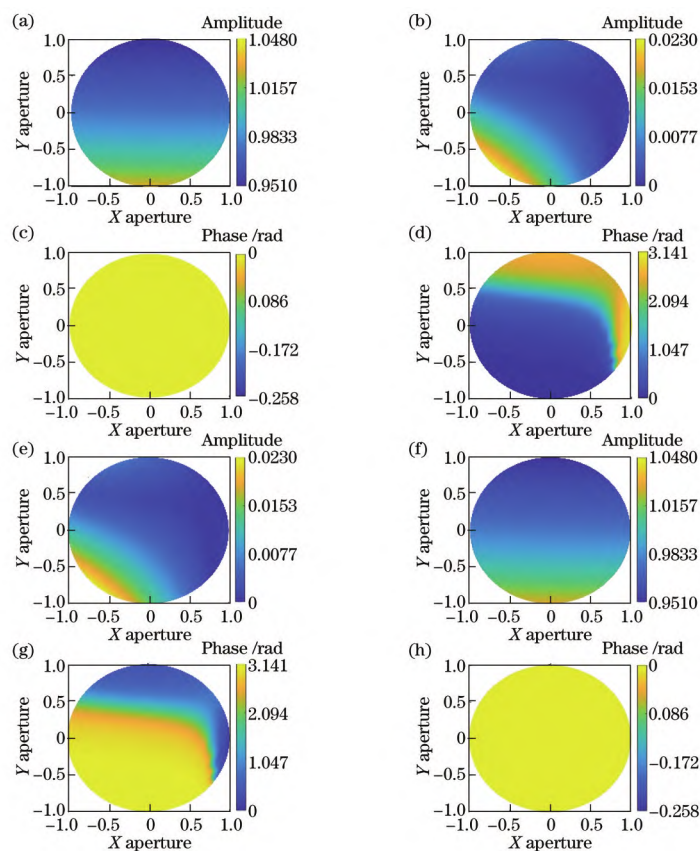


图 12 加入补偿器件后的琼斯瞳图。(a) A_{xx} ; (b) A_{xy} ; (c) ϕ_{xx} ; (d) ϕ_{xy} ; (e) A_{yx} ; (f) A_{yy} ; (g) ϕ_{yx} ; (h) ϕ_{yy}

Fig. 12 Jones pupils of system after adding compensation device. (a) A_{xx} ; (b) A_{xy} ; (c) ϕ_{xx} ; (d) ϕ_{xy} ; (e) A_{yx} ; (f) A_{yy} ; (g) ϕ_{yx} ; (h) ϕ_{yy}

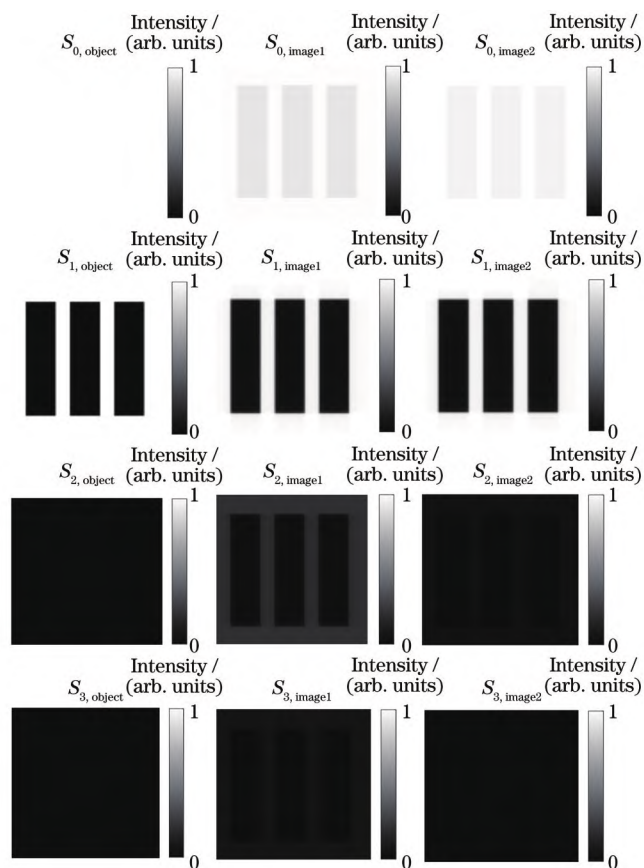


图 13 水平线偏振光入射时物面与像面 Stokes 矢量图

Fig. 13 Stokes vector diagrams of object plane and image plane when horizontally polarized light is incident

表 4 不同波长条件下系统偏振信息获取精度

Table 4 Accuracy of system polarization information acquisition at different wavelengths

Wavelength / μm	$S_{0,\text{image1}}$	$S_{0,\text{image2}}$	Accuracy improvement of S_0 / %	$S_{2,\text{image1}}$	$S_{2,\text{image2}}$	Accuracy improvement of S_2 / %	$S_{3,\text{image1}}$	$S_{3,\text{image2}}$	Accuracy improvement of S_3 / %
3.7	0.966	0.985	1.9	0.045	0.021	2.4	0.034	0.012	2.2
4.25	0.978	0.996	1.8	0.036	0.014	2.2	0.021	0.001	2.0
4.8	0.982	0.999	1.6	0.025	0.005	2.0	0.015	0.001	1.4

二向衰减和相位延迟的一半以上。提出了使用各向同性的弱偏振器件 LD 和 LR 补偿 DMD 时引入的偏振像差的方法。比较了补偿前、后的光学系统光瞳处的像差分布和光学系统的琼斯瞳,并以线偏振光靶标物体为例,对比了补偿前后的偏振成像效果。结果表明,这种补偿方法简单有效,不仅大大减小偏振像差的幅度,而且也减小了系统偏振串扰对入射光斯托克斯矢量各分量的影响。

为了进一步简化系统光路,未来可利用 ZEMAX 的组合操作数编制含偏振像差控制能力的优化评价函数,通过直接优化光学系统结构,包括各个自由曲面反射镜和各镜片间距,来同时控制系统的光学波像差和偏振像差,以在不使用补偿器件的前提下优化系统的偏振成像效果。

参 考 文 献

- [1] Chipman R A. Polarization aberrations[D]. Tucson: University of Arizona, 1987.
- [2] 罗红妹. 高性能复杂光学系统的偏振光传输分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
Luo H M. Polarization analysis of high-quality complex optical systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [3] Wang K, Zhu J P, Liu H. Degree of polarization based on the three-component pBRDF model for metallic materials[J]. Chinese Physics B, 2017, 26(2): 024210.
- [4] Wang K, Zhu J P, Liu H, et al. Model of bidirectional reflectance distribution function for metallic materials[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(9): 094201.
- [5] 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.
- [6] Atwood J, Skidmore W, Anupama G C, et al. Polarimetric analysis of the Thirty Meter Telescope (TMT) for modeling instrumental polarization characteristics[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9150: 404-413.
- [7] Chipman R A. Polarized light and optical systems[M]. Boston: CRC Press, 2019.
- [8] He H C, Ji Y Q, Zhou J K, et al. Imaging quality analysis and evaluation of optical polarization imaging system with optical transfer matrix[J]. Optik, 2013, 124 (24): 6857-6860.
- [9] He H C, Shen Y J A W. Polarization aberration of

optical systems in imaging polarimetry[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(s1): S11102.

- [10] Shang H B, Zhang L W, Liu C L, et al. Optimization based on sensitivity for material birefringence in projection lens[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(6): 062201.
- [11] Zhou Z L, Shang H B, Sui Y X, et al. Useful way to compensate for intrinsic birefringence caused by calcium fluoride in optical lithography systems[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(3): 032201.
- [12] 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率的影响[J]. 光学学报, 2020, 40 (8): 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.
- [13] Luo J, You C X, He X, et al. Comparisons between an on-axis three-mirror anastigmat telescope and an off-axis one: polarization aberrations[J]. Applied Optics, 2021, 60 (22): 6438-6447.
- [14] Luo J, He X, Fan K, et al. Effects of polarization aberrations in an unobscured off-axis space telescope on its PSF ellipticity[J]. Optics Express, 2020, 28(25): 37958-37970.
- [15] 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 C, et al. Research on polarization aberration characteristics of off-axis freeform surface optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41 (18): 1822002.
- [16] 贾文涛, 贺文俊, 吴凌昊, 等. 偏振激光雷达中望远系统的偏振像差校正[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 0226002.
Jia W T, He W J, Wu L H, et al. Polarization aberration correction for telescopic system in polarization lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(2): 0226002.
- [17] 徐百威, 胡诗杰, 李杰, 等. 偏振色差对自适应光学系统校正能力的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57 (15): 150101.
Xu B W, Hu S J, Li J, et al. Impact of polarization chromatic aberration on adaptive optical systems[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(15): 150101.
- [18] 韩庆, 王健, 熊峥, 等. 用于长波红外目标模拟器的 DMD 衍射特性分析[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(5): 0504006.
Han Q, Wang J, Xiong Z, et al. Diffraction characteristics

- analysis for DMD-based scene projectors in the long-wave infrared[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(5): 0504006.
- [19] Ma C, Lin H, Zhang G D, et al. An efficient calibration method for multi-spectral imaging[J]. *Optics Communications*, 2018, 420: 14-25.
- [20] Zhang W Y, Song H Y, He X, et al. Deeply learned broadband encoding stochastic hyperspectral imaging[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 108.
- [21] Wang F, Wang C L, Chen M L, et al. Far-field super-resolution ghost imaging with a deep neural network constraint[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 1.
- [22] Zhang X D, Xie J N, Li C L, et al. MEMS-based super-resolution remote sensing system using compressive sensing[J]. *Optics Communications*, 2018, 426: 410-417.
- [23] Yang J, He Q, Liu L, et al. Anti-scattering light focusing by fast wavefront shaping based on multi-pixel encoded digital-micromirror device[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 149.
- [24] Yun G, Crabtree K, Chipman R A. Skew aberration: a form of polarization aberration[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(20): 4062-4064.
- [25] Rakić A D. Algorithm for the determination of intrinsic optical constants of metal films: application to aluminum [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(22): 4755-4767.
- [26] 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.
- [27] Yun G, McClain S C, Chipman R A. Three-dimensional polarization ray-tracing calculus II: retardance[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(18): 2866-2874.
- [28] McGuire J P, Jr, Chipman R A. Polarization aberrations. 1. Rotationally symmetric optical systems[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(22): 5080-5100.
- [29] McGuire J P, Jr, Chipman R A. Polarization aberrations. 2. Tilted and decentered optical systems[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(22): 5101-5107.
- [30] Yang Y F, Yan C X. Polarization property analysis of a periscopic scanner with three-dimensional polarization ray-tracing calculus[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(6): 1343-1350.
- [31] Lam W S T, Chipman R A. Balancing polarization aberrations in crossed fold mirrors[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(11): 3236-3245.
- [32] Born M, Clemmow P C, Gabor D, et al. Principles of optics[M]. Oxford: Pergamon Press, 1959.
- [33] Ruoff J, Totzeck M. Orientation Zernike polynomials: a useful way to describe the polarization effects of optical imaging systems[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2009, 8(3): 031404.
- [34] Goldstein D. Polarized light[M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.