

文章编号: 1002-1582(2026)03-0308-10

反射镜膜层折射率对 Golay3 稀疏孔径光学系统偏振成像特性的影响研究

徐安^{1,2}, 陈宝华^{1*}, 吴泉英^{1**}, 范君柳¹, 刘熙煜^{1,3}

(1. 江苏省高校低碳能源高效转化与利用重点实验室 苏州科技大学 物理科学与技术学院, 江苏 苏州 2150090)

(2. 江苏省研究生工作站 苏州一光仪器有限公司, 江苏 苏州 215006)

(3. 江苏省研究生工作站 张家港市光学仪器有限公司, 江苏 苏州 215616)

摘 要: 稀疏孔径光学成像系统可有效降低体积与重量, 在天文观测与遥感领域具有广阔应用前景。针对 Golay3 稀疏孔径成像系统, 通过偏振光线追迹计算系统在不同反射镜膜层折射率下的偏振像差, 获取斯托克斯参数并开展成像仿真。结果表明: 随着膜层折射率的增加, Golay3 稀疏孔径光学系统的二向衰减显著增强, 相位延迟则轻微减弱; 振幅响应矩阵和调制传递矩阵的非对角元素变化显示, 膜层折射率的增加会导致偏振串扰随之增强。成像仿真进一步表明, 降低膜层折射率可显著改善 Golay3 系数孔径光学系统的成像质量。当膜层折射率 n_r 从 1.5 降至 0.5, 斯托克斯分量 S_0 的峰值信噪比、清晰度评价值和边缘保持指数分别提升 4.1%、26.0% 和 25.7%。采用较低的膜层折射率能有效抑制 Golay3 稀疏孔径光学系统的偏振像差, 从而更好地保持图像的清晰度、对比度及纹理细节。

关 键 词: 稀疏孔径; 偏振图像; 偏振串扰; 振幅响应矩阵; 调制传递矩阵

中图分类号: TH75

文献标识码: A

Influence of refractive index of reflective film on polarization imaging characteristics of golay3 sparse aperture optical system

XU An^{1,2}, CHEN Baohua^{1*}, WU Quanying^{1**}, FAN Junliu¹, LIU Xiyu^{1,3}

(1. Key Laboratory of Efficient Low-carbon Energy Conversion and Utilization of Jiangsu Provincial Higher Education Institutions, School of Physical Science and Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

(2. Graduate Workstation in Suzhou FOIF Co., Ltd. Suzhou 215006, China)

(3. Graduate Workstation in Suzhou Zhangjiagang Optical Instrument Co., Ltd. Suzhou 215616, China)

Abstract: Sparse-aperture optical imaging systems can effectively reduce system volume and weight, offering broad application prospects in astronomical observation and remote sensing. A Golay3 sparse-aperture imaging system is investigated. Polarization ray tracing is performed to calculate the polarization aberrations under different refractive indices of the reflective mirror coating, and the Stokes parameters are obtained for imaging simulation. The results show that as the refractive index of the coating increases, the diattenuation of the Golay3 sparse-aperture system increases significantly, while the phase retar-

收稿日期: 2026-02-05; 收到修改稿日期: 2026-02-11

基金项目: 国家自然科学基金 (62275187, 61875145, 11804243); 苏州市产业前瞻与关键核心技术项目 (SYC2022145); 江苏省“十四五”重点学科项目 (2021135); 苏州市光学精密测试技术重点实验室建设项目 (SZS201202); 江苏省研究生科研创新计划项目 (KYCX25_3565)

作者简介: 徐安 (2001—), 男, 硕士研究生, 从事稀疏孔径和偏振方面的研究。937423205@qq.com

陈宝华 (1990—), 男, 实验师, 硕士, 从事光学仪器与光学设计等方面的研究。

吴泉英 (1965—), 女, 教授, 博士, 从事光学设计与光学信息处理等方面的研究。

* 通讯作者: chenbaohua@usts.edu.cn; wqycyh@usts.edu.cn

dance decreases slightly. The variations in the off-diagonal elements of the amplitude response matrix (ARM) and the modulation transfer matrix (MTM) indicate that the increase in the coating refractive index leads to enhanced polarization crosstalk. Imaging simulation further demonstrates that reducing the coating refractive index can significantly improve the imaging quality of the Golay3 sparse-aperture system. When the refractive index decreases from 1.5 to 0.5, the peak signal-to-noise ratio (PSNR), sharpness evaluation value, and edge preservation index (EPI) of the Stokes component S_0 increase by 4.1%, 26.0%, and 25.7%, respectively. Adopting a lower refractive index of the reflective coating can effectively suppress the polarization aberrations of the Golay3 sparse-aperture optical system, thereby better preserving image clarity, contrast, and texture details.

Keywords: sparse aperture; polarization image; polarization crosstalk; amplitude response matrix; modulation transfer matrix

0 引言

空间分辨率是评价光学系统成像性能的关键指标, 提高分辨率通常依赖于增大系统口径^[1]。然而, 大口径光学元件在加工制造、装调检测及成本控制等方面均面临较大挑战。稀疏孔径成像技术采用多个子镜替代单一大口径, 通过阵列结构优化和共相位误差校正获得与等效单一大口径系统相当的成像分辨能力, 同时兼具轻量化、低成本和易实现等优势^[2,3], 因而在对地遥感、天文观测等领域具有重要应用价值。另一方面, 偏振成像不仅能够获取目标的强度信息, 还能够表征目标表面的形貌、材质及散射特性, 从而弥补传统强度成像信息维度不足的问题, 在目标识别、遥感探测等任务中具有独特优势。对于稀疏孔径光学系统而言, 由于成像光束的不同偏振分量在反射镜面具有不同的反射系数, 历经多次反射后易引入二向衰减、相位延迟和偏振串扰等偏振像差, 进而影响系统的最终成像质量, 因此开展稀疏孔径光学系统偏振成像特性研究具有重要意义。1987年, Chipman建立二维偏振像差函数来评估光学系统中的偏振像差, 并在1989年提出偏振像差函数的二阶扩展形式^[4]。罗敬等通过偏振光线追迹技术研究了无遮拦离轴天文望远镜中偏振像差与光学效率的关系, 指出系统优化需同时考虑波像差和偏振像差^[5]。随着下一代大口径天文望远镜的发展, 偏振像差已被认为是限制高对比度成像性能的重要因素之一。Chipman等在对下一代巨型分段镜望远镜的系统分析中指出, 反射镜引入的偏振像差会显著影响日冕仪性能, 其主要来源并非镜面几何误差, 而是镜面多层镀膜在不同入射角下产生的偏振相关反射效应^[6]。Breckinridge等研究表明, 天文望远镜中的偏振像差主要来源于反射镜镀膜特性和光线非垂直入射, 这些因素导致不同偏振分量的PSF强度差异、位置剪切和“幽灵”PSF, 从而显著影响高

对比度成像、日冕仪和高精度天体测量性能^[7]。Anche等通过模拟评估了6.5米空间望远镜中偏振像差对日冕仪性能的影响, 发现反射镜镀膜是决定像差强度的关键因素^[8]。在稀疏孔径偏振成像方面, 国内外已开展相关研究。李智翔等针对稀疏孔径光学成像系统的偏振特性进行了研究, 结果表明稀疏孔径光学系统中子镜阵列结构与填充因子的变化均会改变二向衰减、相位延迟等偏振像差, 从而影响系统成像质量^[9]。Ashcraft等针对下一代大型拼接式望远镜, 进一步分析了子镜间镀膜差异所引起的偏振像差及其对高对比成像和偏振观测性能的影响, 结果显示, 子镜间镀膜特性的不一致会显著改变系统偏振像差分布, 并进一步影响高对比成像及偏振观测性能^[10]。稀疏孔径光学系统中各子反射镜膜层折射率直接调控入射光的偏振响应, 影响系统的二向衰减、相位延迟及偏振串扰水平, 最终影响成像质量。因此, 深入研究膜层折射率的影响, 对优化稀疏孔径系统的镀膜设计与提升偏振成像性能具有重要意义。

论文以Golay3稀疏孔径光学系统为研究对象, 采用三维偏振光线追迹(Polarized Ray Tracing, PRT)方法^[11,12], 研究反射镜的膜层折射率变化对于Golay3稀疏孔径光学系统成像性能的影响, 分析系统的二向衰减和相位延迟, 并构建系统的琼斯光瞳矩阵(Jones Pupil Matrix), 计算得到望远镜系统的振幅响应矩阵(Amplitude Response Matrix, ARM)和调制传递矩阵(Modulation Transfer Matrix, MTM)。最后通过开展成像模拟, 分析偏振像差对斯托克斯参量图像的影响。

1 基本原理

1.1 二向衰减和相位延迟

根据菲涅尔定律, 当光束由空气入射到反射镜中, 经表面膜层反射, 入射光束 p 、 s 偏振分量的反射系数可写为

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

式中, n_r 为反射镜膜层折射率; k 表示膜层的消光系数^[13]; θ_i 为入射角; ϕ_p 、 ϕ_s 分别为 p 、 s 偏振分量的相位变化。光学系统的偏振像差主要包括二向衰减 D 和相位延迟 δ 两个参数。二向衰减用于描述不同偏振分量振幅响应的差异, 相位延迟用于描述 p 、 s 偏振分量在传播过程中产生的相位差异, 定义分别如下

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

$$\delta = |\phi_p - \phi_s| \quad (3)$$

式中, $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 分别表示系统对不同偏振分量的

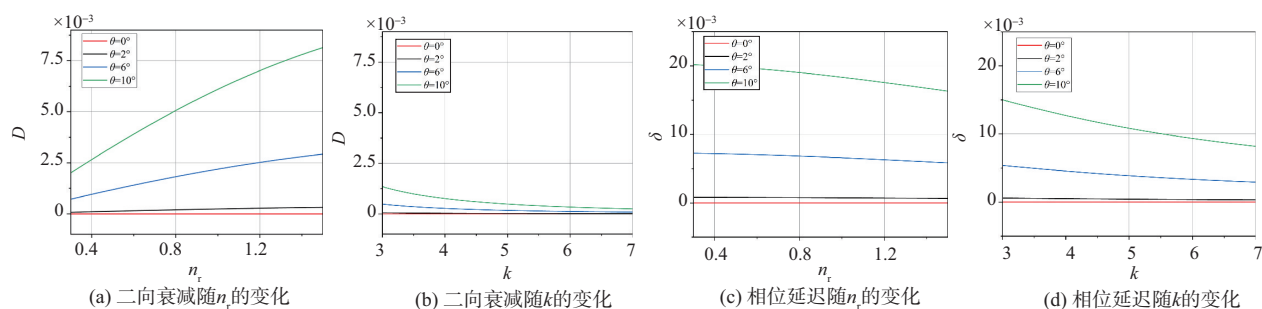


图 1 二向衰减 D 和相位延迟 δ 随 n_r 及 k 的变化情况

1.2 琼斯矩阵与振幅响应矩阵

琼斯光瞳描述了不同偏振态 (p 、 s 分量) 的振幅反射系数和相位变化随光瞳坐标的变化, 通常为 2×2 矩阵^[14]。在 $p-s$ 坐标系中, 琼斯矩阵可写为

$$J_{ps} = \begin{bmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (4)$$

在 $x-y$ 坐标系中, 琼斯矩阵 J_{ps} 则可以改写为 $J(x, y) = R(-\theta_{\text{out}}) J_{ps} R(\theta_{\text{in}})$, 其中 $R(\theta)$ 为坐标旋转矩阵

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 θ_{in} 和 θ_{out} 分别表示入射端和出射端 $p-s$ 坐标系相对于 $x-y$ 坐标系的夹角。对于两反式 Golay3 稀疏孔径光学系统, 广义琼斯矩阵 $J^G(x, y)$ 可表示为

$$J^G(x, y) = \sum_{n=1}^3 P^n(x, y) J^n(x, y) \quad (6)$$

最大和最小反射率。

根据式 (2) 和 (3), 可分别计算入射光束在金属表面反射时, 膜层折射率 n_r 与消光系数 k 对偏振像差的影响, 图 1 给出 0° 、 2° 、 6° 和 10° 入射角下的计算结果。参照常反射镜金属膜参数范围, 取 $n_r = 0.3 - 1.5$, $k = 3 - 7$ 。图 1 (a) 给出了消光系数 k 固定时, 二向衰减 D 随折射率 n_r 的变化规律; 图 1 (b) 给出了折射率 n_r 固定时, D 随消光系数 k 的变化规律。对比可知, 在同一入射角, 折射率变化引起的二向衰减变化幅度大于消光系数变化所引起的变化。以 10° 入射角为例, 当 n_r 由 0.3 增大至 1.5 时, 二向衰减 D 增大至 6.8×10^{-3} ; 而 k 由 3 增大至 7 时, D 仅改变约 1.1×10^{-3} 。图 1 (c) 显示了 k 固定时, 相位延迟 δ 随 n_r 的变化; 图 1 (d) 显示了 n_r 固定时, δ 随 k 的变化。对比表明, 在同一入射角, 折射率与消光系数的变化对相位延迟的影响程度均较小且接近。因此, 在本文后续研究中, 重点考察折射率变化对偏振效应的影响, 并固定消光系数。

$$P^n(x, y) = \text{circ} \left(\frac{\sqrt{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2}}{a} \right) \quad (7)$$

式中, $P^n(x, y)$ 为第 n 个子镜的光瞳函数; 中心坐标为 (x_n, y_n) , 子镜半径为 a ; J^n 表示第 n 个子镜的琼斯光瞳矩阵, 可表示为

$$J^n = J2 \cdot J1^n e^{i(\phi_1^n + \phi_2)} \quad (8)$$

式中, $J1^n$ 和 $J2$ 分别表示入射光束在第 n 个子镜和次镜反射对应的琼斯光瞳矩阵; ϕ_1^n 和 ϕ_2 分别表示入射光束在第 n 个子镜和次镜反射时的相位变化, 式 (6) 中 J^G 的矩阵形式为

$$J^G(x, y) = \begin{bmatrix} J^{XX}(x, y) & J^{XY}(x, y) \\ J^{YX}(x, y) & J^{YY}(x, y) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, $J^{XX}(x, y)$ 和 $J^{YY}(x, y)$ 表示同偏振态分量之间的传递特性, J^{XY} 和 J^{YX} 表示不同偏振态分量之间的耦合与串扰。

将式 (9) 进行傅里叶变换, 得到系统的振幅响应矩阵 M_{ARM} ,

$$\mathbf{M}_{\text{ARM}} = \mathcal{F} \{ \mathbf{J}^G(x, y) \} \quad (10)$$

1.3 调制传递矩阵

在非相干光照明下, 目标的偏振态采用斯托克斯参量描述, 斯托克斯参量的定义式为

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \\ I_R - I_L \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, I_0 、 I_{90} 、 I_{45} 、 I_{135} 分别代表 0° 、 90° 、 45° 、 135° 方向线偏振光的光强值; S_0 、 S_1 、 S_2 为线偏振分量, S_3 是圆偏振分量, 由右旋圆偏光的光强值 I_R 和左旋圆偏光的光强值 I_L 计算得到, 在实际情况中, S_3 参量往往很小, 故一般忽略不计, 只考虑 S_0 、 S_1 、 S_2 参量。

将式(10)计算得到的 $\mathbf{M}_{\text{ARM}}$, 求解克罗内克积并进行酉变换, 得到成像系统的米勒点扩散矩阵

$$\mathbf{M}_{\text{MPSM}} = \mathbf{U} \cdot (\mathbf{M}_{\text{ARM}} \otimes \mathbf{M}_{\text{ARM}}) \cdot \mathbf{U}^{-1} \quad (12)$$

式中, $\mathbf{U}$ 是酉矩阵; $\otimes$ 是克罗内克积算符。像的斯托克斯参数可根据米勒点扩散矩阵和目标物斯托克斯参数的卷积计算得到

$$S_i^* = \mathbf{M}_{\text{MPSM}} * S_i \quad (13)$$

式中, $S_i^*(i=0,1,2,3)$ 为像的斯托克斯参数; $S_i(i=0,1,2,3)$ 为物的斯托克斯参数; $*$ 是卷积算符。

光学传递矩阵 (Optical transfer matrix, OTM) 描述光学系统对物体各斯托克斯分量的调制特性, OTM可通过 $\mathbf{M}_{\text{MPSM}}$ 的傅里叶变换得到

$$\text{OTM} = \mathcal{F} [\mathbf{M}_{\text{MPSM}}] \quad (14)$$

通过对这些矩阵元素取模得到MTM, 如下式所示

$$\begin{aligned} \text{MTM} &= |\text{OTM}| \\ &= \begin{pmatrix} M_{00} & M_{01} & M_{02} & M_{03} \\ M_{10} & M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{20} & M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{30} & M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

式中, 矩阵元素 M_{ij} 表示入射光的斯托克斯分量 $S_i(i=0,1,2,3)$ 映射为出射光的斯托克斯分量 $S_j(j=0,1,2,3)$ 所对应的调制传递函数。

2 Golay3稀疏孔径望远镜的偏振像差分析及成像仿真

Golay3稀疏孔径成像系统的结构如图2所示, 该系统采用卡塞格林光学结构, 工作波长为 $0.55\mu\text{m}$, 系统的 F 数为3.5。主反射镜M1由三个口径为100mm的子镜构成, 主反射镜的包围孔径直径为300mm, M2为次反射镜。为简化分析膜层折射率

对Golay3稀疏孔径成像系统偏振成像的影响, 假设M1和M2镀相同材质反射膜, 二者膜层折射率与消光系数一致。同时参考常用金属铝反射膜的典型消光系数范围^[15], M1和M2反射膜层的消光系数统一取7.0。

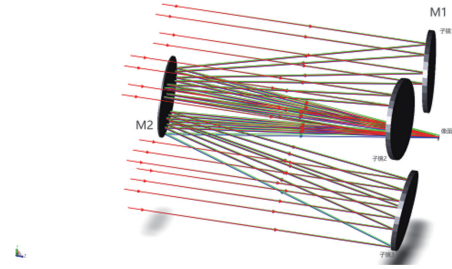


图2 Golay3稀疏孔径成像系统

2.1 偏振像差

利用ZEMAX光学设计软件对图2中的Golay3稀疏孔径光学系统进行仿真, 改变M1和M2的反射镜膜层折射率 n_r , 根据式(2)和(3), 分别计算Golay3稀疏孔径光学系统的二向衰减 D 和相位延迟 δ , D 与 δ 的分布如图3所示。

由图3(a)~(d)可知, 随着反射镜膜层折射率 n_r 由0.5增大至1.5, Golay3稀疏孔径光学系统的 D 在整个出瞳范围内明显增强, 其最大值由 1.72×10^{-3} 提升至 4.97×10^{-3} , 同时其分布形态由稀疏孔径子镜阵列决定, 基本保持不变。由图3(e)~3(h)可知, n_r 变化对 δ 影响较小, 当 n_r 由0.5增大至1.5, δ 大值由 $2.42 \times 10^{-2}\text{rad}$ 减小至 $2.32 \times 10^{-2}\text{rad}$ 。表明反射镜膜层折射率 n_r 增大会主要影响系统的二向衰减, 而相位延迟变化幅度较小。

构建系统的琼斯光瞳矩阵。根据式(10)对光瞳矩阵进行傅里叶变换, 分别得到不同反射镜膜层折射率下的ARM, 结果如图4所示。

由图4(a)~(d)所示, 反射镜膜层折射率 n_r 改变时, Golay3稀疏孔径成像系统的ARM对角线元素 ARM_{xx} 与 ARM_{yy} 的分布基本保持不变, 表明相同偏振态之间的传递特性受折射率变化的影响较小。而非对角元素 ARM_{xy} 与 ARM_{yx} 尽管分布形态保持一致, 但随着 n_r 的增加, ARM_{xy} 与 ARM_{yx} 的峰值在由 2.94×10^{-3} 增加到 3.00×10^{-3} , 增长约2.0%, 表明反射镜膜层折射率 n_r 的增大会导致不同偏振态之间的串扰增强。

2.2 调制传递矩阵

根据式(12), 对ARM求解克罗内克积并进行酉变换, 得到系统的米勒点扩散矩阵。对米勒点扩散矩阵进行傅里叶变换可获得系统的光学传递矩阵OTM, 对光学传递矩阵取模得到调制传递矩阵MTM, 结果如图5所示。

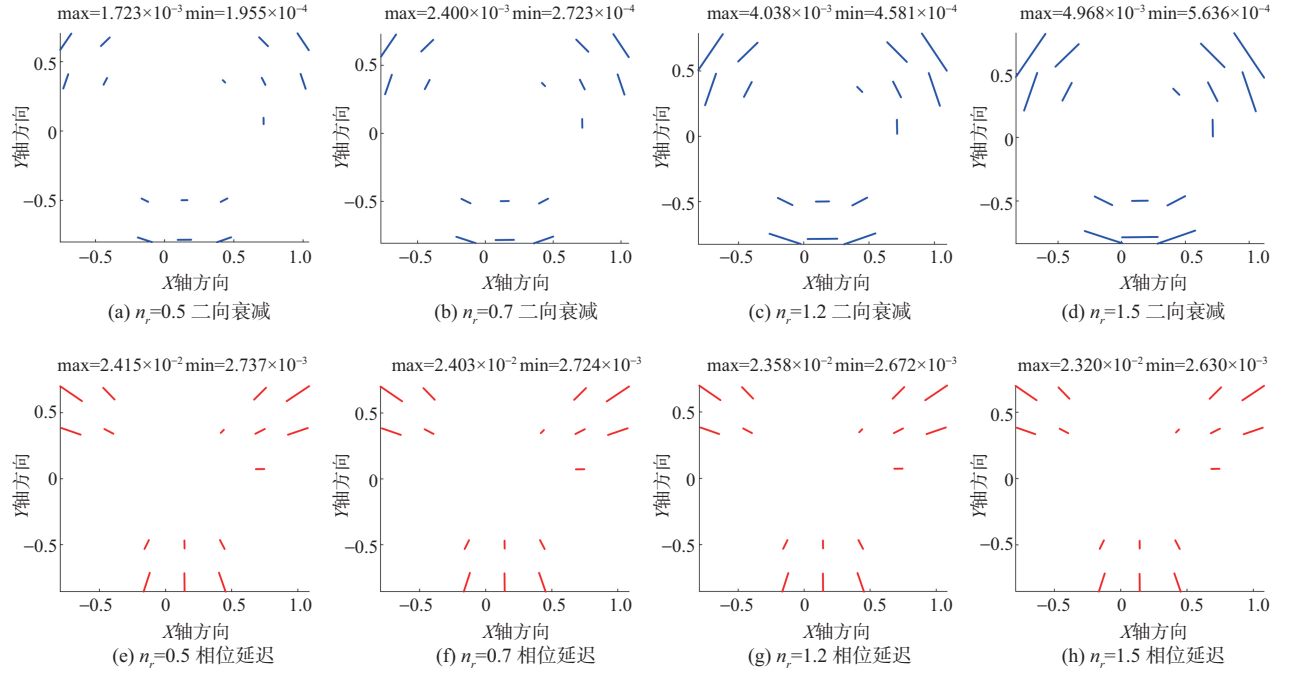


图 3 系统二向衰减与相位延迟的分布图

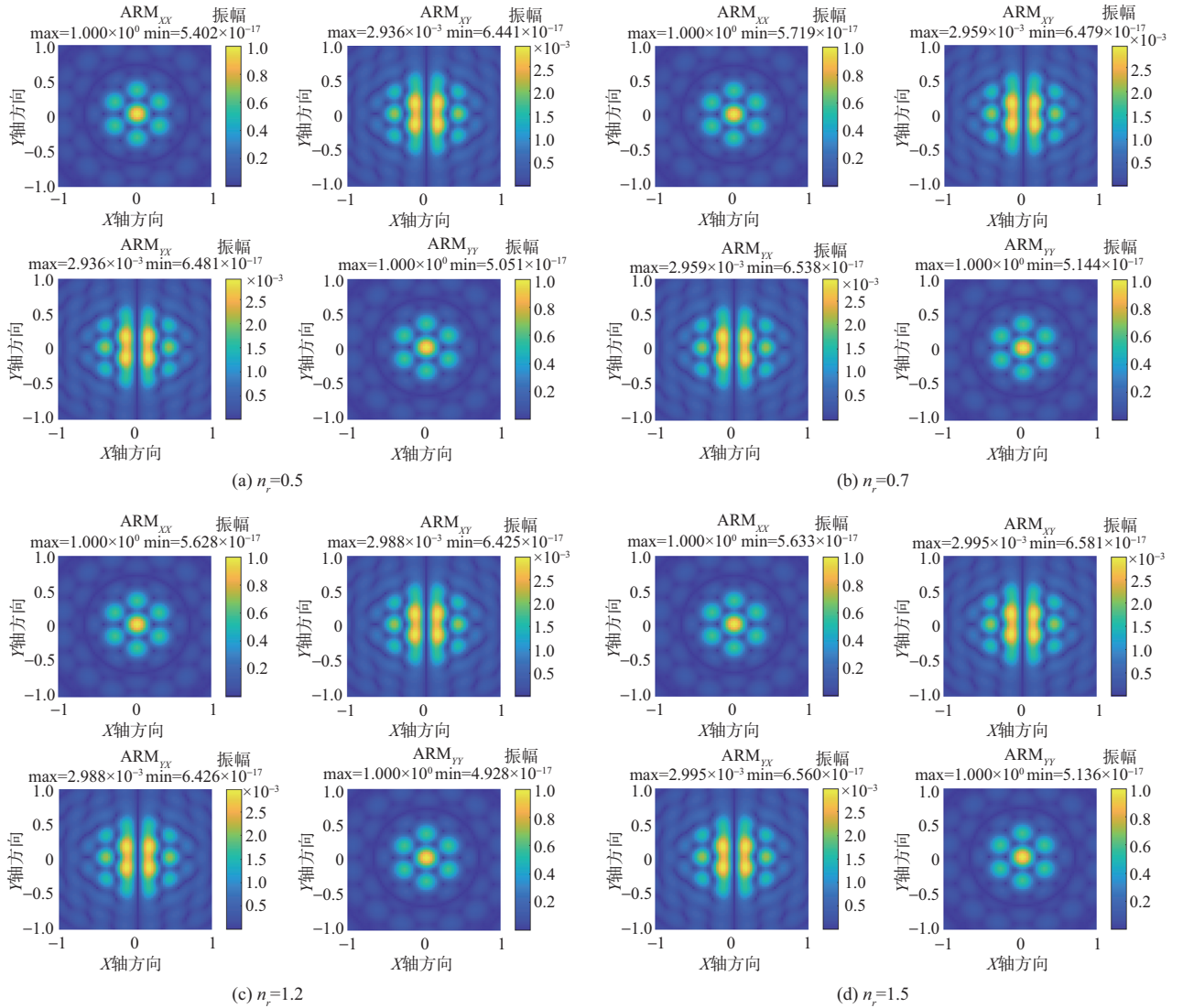


图 4 振幅响应矩阵分布图

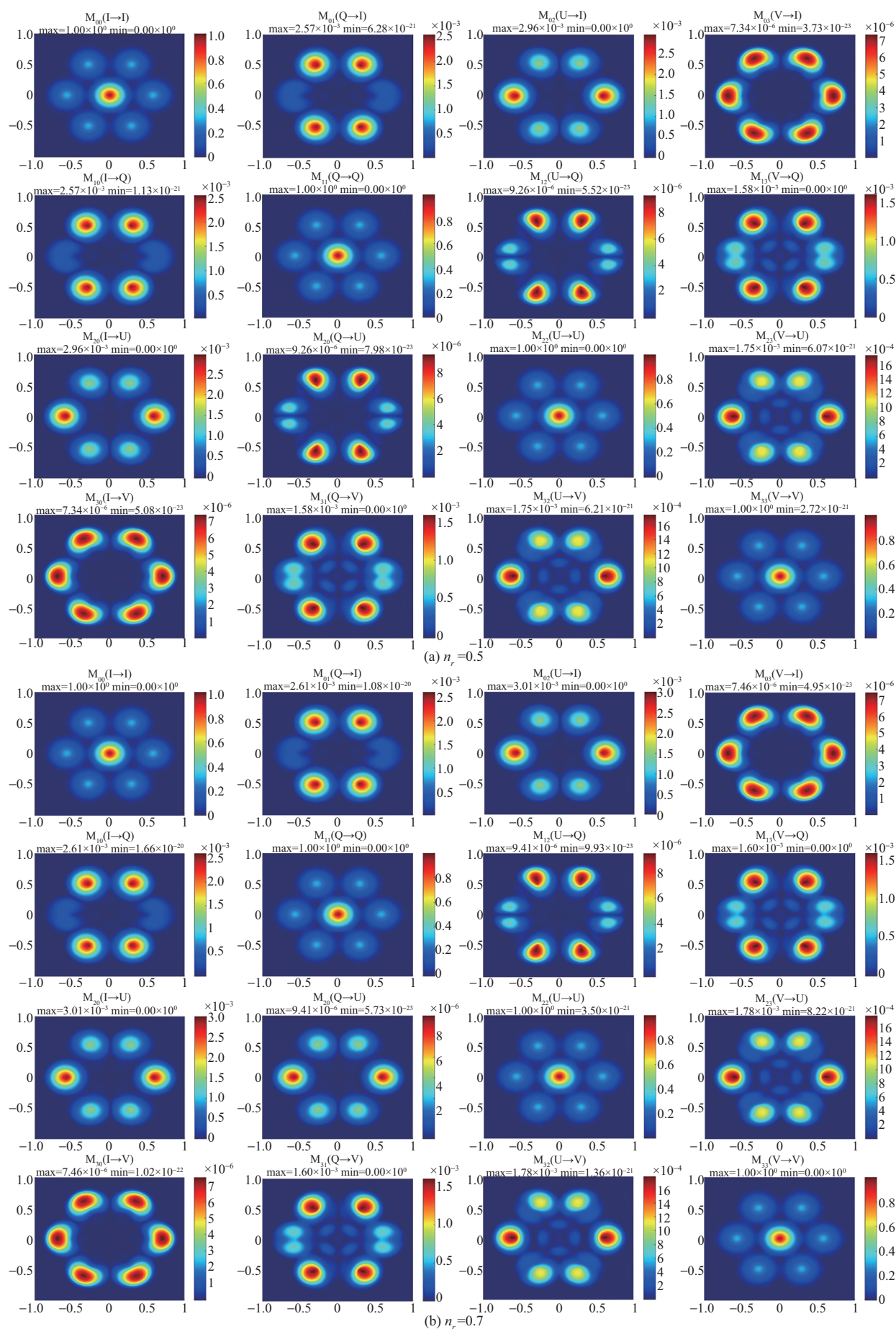


图5 调制传递矩阵分布

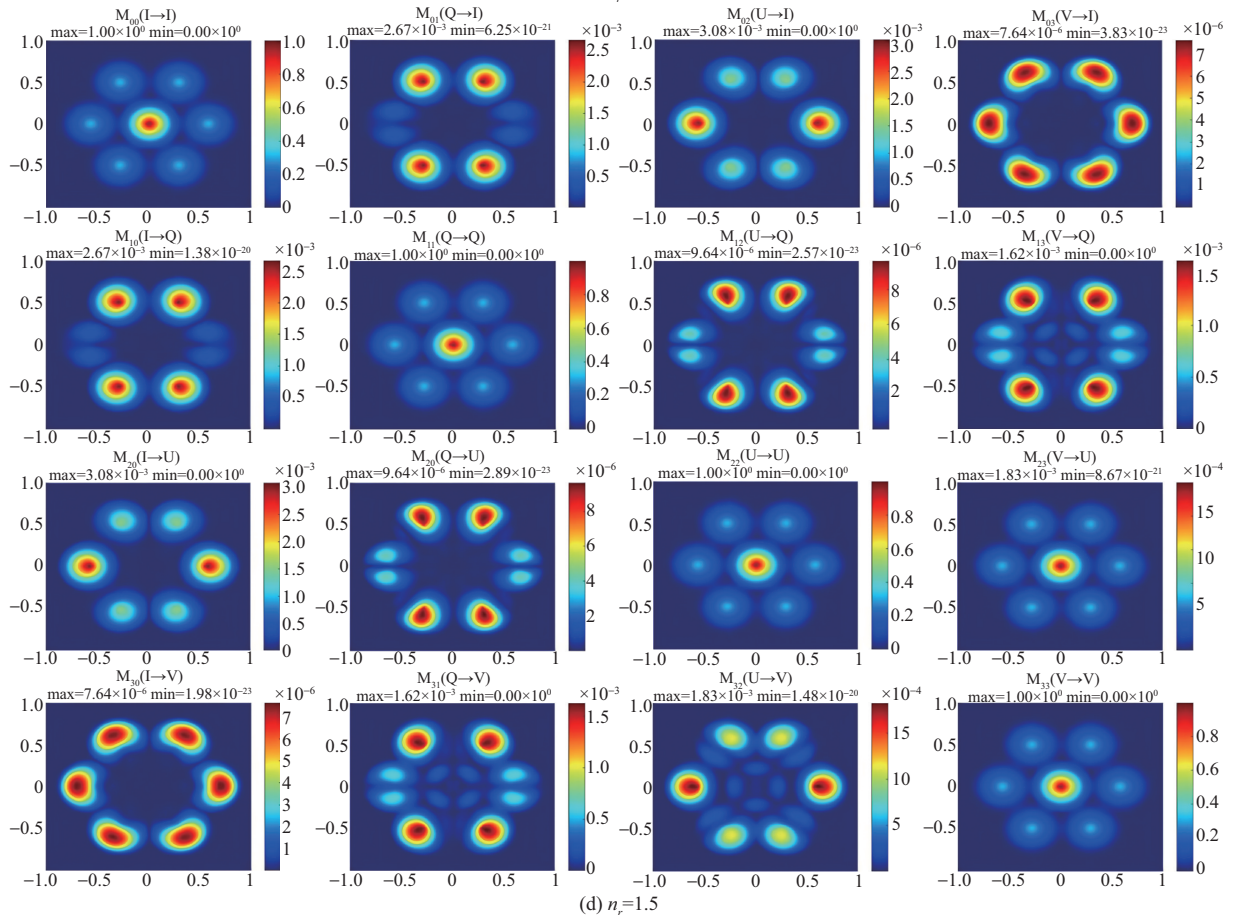
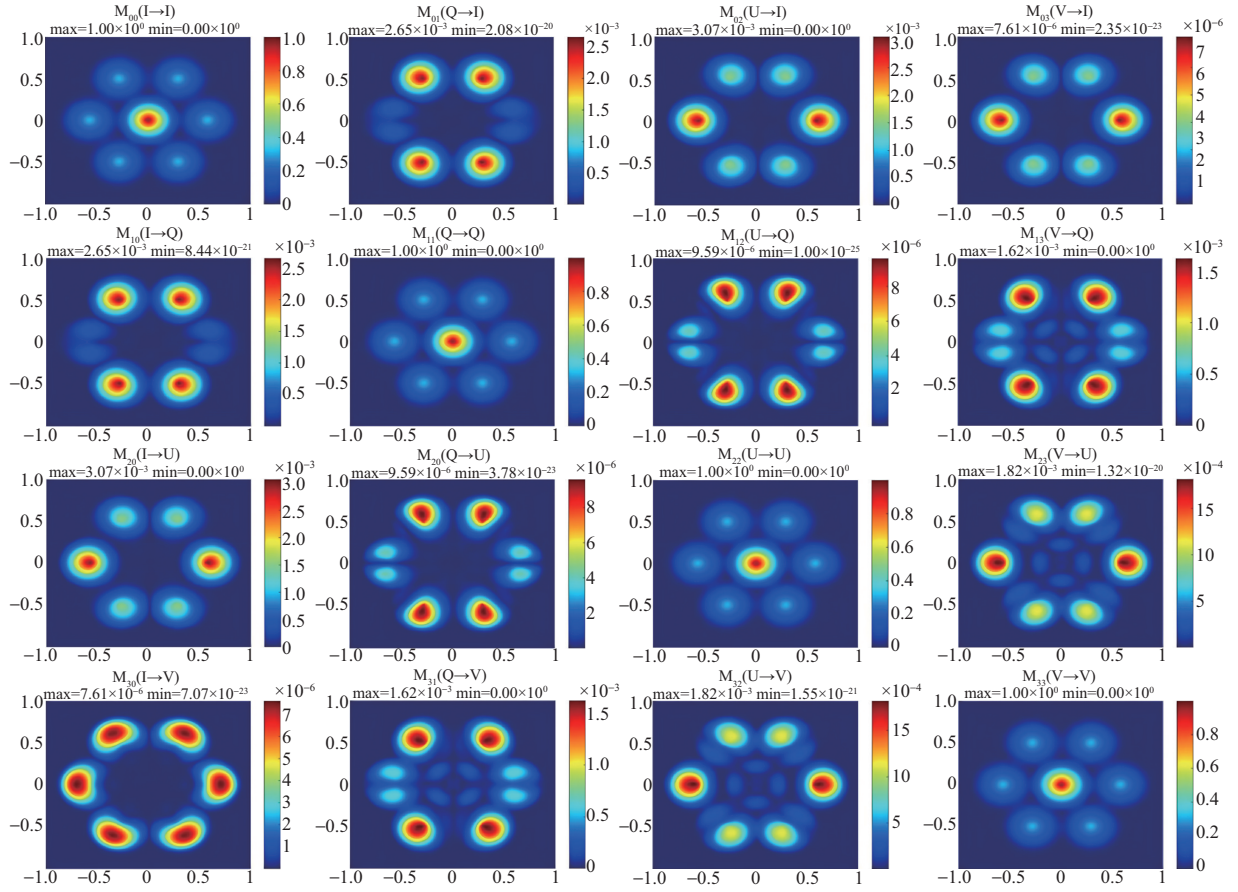
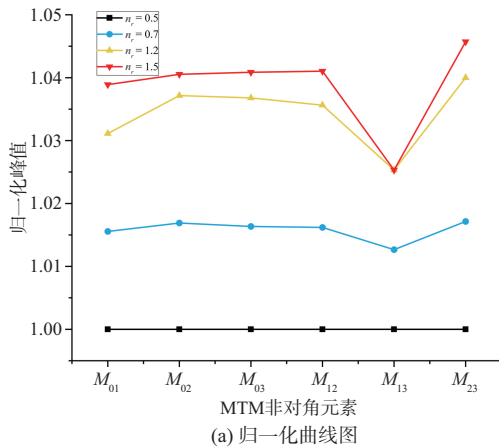


图 5 调制传递矩阵分布(续)

MTM的对角线元素描述了输入与输出为相同斯托克斯参量的调制传递特性,而非对角线元素描述了输入与输出为不同斯托克斯参量的调制传递特性。由图5(a)~(d)可知,随着反射镜膜层折射率 n_r 的改变,Golay3稀疏孔径成像系统的MTM对角元素和非对角线元素分布形态均基本保持不变,其中的对角线元素接近衍射受限,分布特征由Golay3稀疏孔径的子镜阵列结构决定,基本不受反射镜膜层折射率 n_r 影响。

图5(a)~(d)中的非对角线元素表明输入和输出为不同斯托克斯参量的调制传递特性,以图5(a)中的第一行第二列元素 M_{01} 为例,表示Golay3稀疏孔径成像系统输入为 S_0 ,输出为 S_1 的传递特性, M_{01} 值的大小反映了二者的偏振串扰程度,随着 n_r 0.5增大至1.5, M_{01} 最大值由 2.57×10^{-3} 增加到 2.67×10^{-3} ,增长3.9%, M_{02} 最大值在由 2.96×10^{-3} 增加到 3.08×10^{-3} ,增长4.1%, M_{03} 最大值在由 7.34×10^{-6} 增加到 7.64×10^{-6} ,增长4.1%, M_{12} 最大值在由 9.26×10^{-6} 增加到 9.64×10^{-6} ,增长4.1%, M_{13} 最大值在由 1.58×10^{-3} 增加到 1.62×10^{-3} ,增长2.5%, M_{23} 最大值在由 1.75×10^{-3} 增加到 1.83×10^{-3} ,



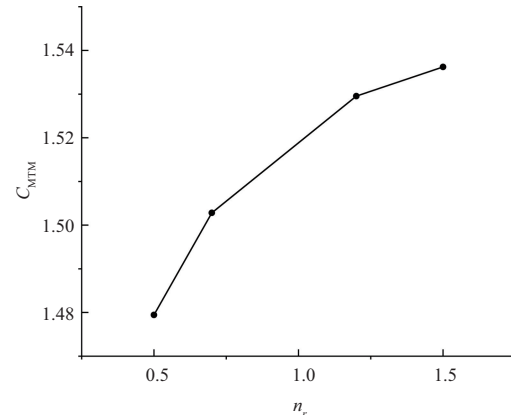
(a) 归一化曲线图

增长4.5%。由此可见,随着反射镜膜层折射率 n_r 增大,Golay3稀疏孔径成像系统中MTM不同斯托克斯参量之间的串扰程度均随之增加。

为进一步分析不同折射率下偏振串扰的变化规律,提取MTM非对角元素 M_{01} 、 M_{02} 、 M_{03} 、 M_{12} 、 M_{13} 和 M_{23} 的最大值,并根据式(16)计算偏振串扰综合指标 C_{MTM} 随折射率 n_r 的变化关系。其中

$$C_{\text{MTM}} = \frac{1}{6} \sum \max |M_{ij}| \quad (16)$$

式中, $M_{ij} \in \{M_{01}, M_{02}, M_{03}, M_{12}, M_{13}, M_{23}\}$ 。 C_{MTM} 能够综合表征系统不同斯托克斯分量之间的总体串扰程度, C_{MTM} 越大,说明系统偏振串扰越强。结果如图6(a)~(b)所示,随着反射镜膜层折射率由0.5增大至1.5, M_{01} 、 M_{02} 、 M_{03} 、 M_{12} 、 M_{13} 和 M_{23} 的最大值均整体升高,表明系统不同斯托克斯分量之间的耦合持续增强。同时, C_{MTM} 由 1.479×10^{-3} 增加到 1.536×10^{-3} ,提升约3.84%。说明随着膜层折射率 n_r 增大,Golay3稀疏孔径系统的整体偏振串扰水平持续增强,且在较高折射率区间其增长趋于平缓。



(b) 偏振串扰综合指标图

图6 偏振串扰图

2.3 偏振成像及处理

论文采用偏振相机采集输入目标图像,并基于Golay3稀疏孔径光学系统模型开展偏振成像仿真与图像评价。由式(11)和式(13)可知,为了获得斯托克斯 S_0 参量图像作为成像目标物,实验需要采集物体的 0° 、 45° 、 90° 和 135° 四个偏振方向的图像来计算。因此,本文采用大恒图像水星系列偏振相机MER-502-79U3M POL以分辨率板图像为目标进行数据采集,实验装置如图7所示。

相机基于Sony IMX250MZR偏振CMOS传感器,分辨率为 2448×2048 ,像元尺寸为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$,采用全局快门成像方式,可在单次曝光条件下同步获取 0° 、 45° 、 90° 和 135° 四个偏振方向的图像,避免了

多次采集引入的配准误差。实验中在统一曝光时间设置下完成偏振图像采集,如图8(a)~8(d)所示。

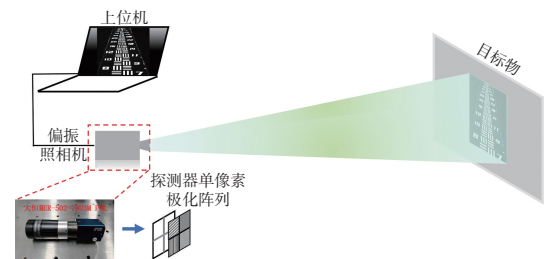


图7 实验示意图

计算得到斯托克斯 S_0 参量,如图9(a)所示,以 S_0 作为目标物,根据式(13)计算Golay3稀疏孔径成像系统反射镜膜层折射率 n_r 分别为0.5、

0.7、1.2 和 1.5 时的成像, 结果如图 9 (b) ~ (e) 所示, 可以看出, 随着反射镜膜层折射率的增大, 斯托克斯 S_0 参数图像的边缘表现出一定程度的模糊现象, 表明图片的细节、纹理等信息丢失加剧。

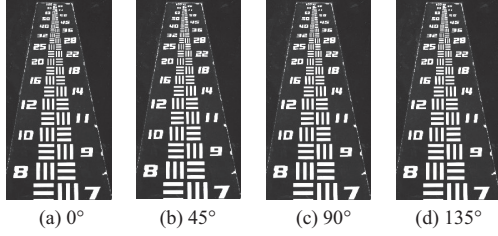


图 8 不同偏振角度的图像

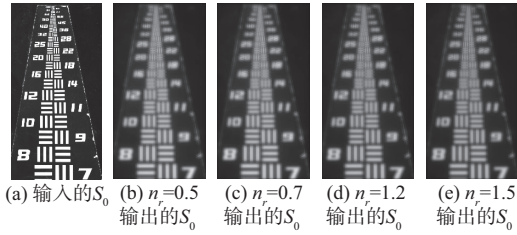


图 9 斯托克斯参数的输入与输出图

为评价不同反射镜膜层折射率下 Golay3 稀疏孔径成像系统的成像质量, 选取输入偏振图像的斯托克斯参量 S_0 作为参考图像, 采用峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)、清晰度 Tenengrad 和边缘保持指数 (Edge Preservation Index, EPI) 对成像结果进行综合评价^[16-18]。PSNR 表示在噪声影响下图像的保真度, 值越大越好; Tenengrad 用于量化图像的清晰度, 值越高表明图像质量越佳; EPI 反映成像系统对边缘信息的保持能力, EPI 越大表示边缘保持性能越好。上述评价指标的数学表达式为

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{I_{\text{MAX}}^2}{\text{MSE}} \right) \quad (17)$$

式中, 均方误差 MSE 的数学表达式为

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{x,y} [I_{\text{out}}(x,y) - I_{\text{in}}(x,y)]^2 \quad (18)$$

$$\text{Tenengrad} = \frac{1}{N} \sum_x \sum_y S(x,y)^2 \quad (19)$$

$$\text{EPI} = \frac{\sum_{x,y} (G_{x,\text{out}}^2 + G_{y,\text{out}}^2)}{\sum_{x,y} (G_{x,\text{in}}^2 + G_{y,\text{in}}^2) + \epsilon} \quad (20)$$

式中, I_{MAX} 为图像中像素可能取到的最大值, $I_{\text{in}}(x,y)$ 和 $I_{\text{out}}(x,y)$ 别为输入图像与成像结果的归一化灰度值; N 为图像像素总数, x 和 y 代表图像中的像素位置, $S(x,y)$ 代表每个点 (x,y) 的梯度强度, G_x 和 G_y 表示由算子计算得到的图像梯度分量; ϵ 取 1×10^{-6} 。

如表 1 所示, 随着 n_r 的增大, 斯托克斯参量 S_0 输出图像的 PSNR 由 13.28dB 降低到 12.74dB, 下降 4.1%, 表明输出斯托克斯 S_0 参量图像保真度下降。Tenengrad 值由 4615.16 降低到 3416.95, 下降 26.0%, 表明斯托克斯 S_0 参量成像图的中高频细节和边缘梯度信息随着反射镜膜层折射率 n_r 的增大发生明显减弱, 图像清晰度显著下降。EPI 由 2.45 降低到 1.82, 下降 25.7%, 进一步说明成像结果中目标边缘结构的保持能力随着反射镜膜层折射率 n_r 的增大明显降低。

表 1 成像评价结果

	$n_r=0.5$	$n_r=0.7$	$n_r=1.2$	$n_r=1.5$
PSNR	13.28	13.18	12.91	12.74
Tenengrad	4615.16	4334.85	3724.96	3416.95
EPI	2.45	2.31	1.98	1.82

3 结 论

本文针对 Golay3 稀疏孔径光学系统开展了偏振光线追迹, 计算了不同反射镜膜层折射率所引起的偏振像差, 分析了膜层折射率变化对系统偏振像差及偏振成像性能的影响。仿真结果表明: 随着反射镜膜层折射率 n_r 的增大, 系统的二向衰减 D 显著增强, 但其空间分布形态基本不变; 相位延迟 δ 对折射率变化相对不敏感。ARM 分析表明, 折射率变化对对角线元素影响较小, 但会显著增大非对角元素的幅值, 说明系统偏振串扰强度增加, 而其空间分布特性基本保持不变。进一步从 MTM 的角度分析, 系统的偏振串扰程度随 n_r 增大而增强, 图像的清晰度与边缘保持能力均明显降低。因此, 在综合考虑镀膜工艺可行性及能量利用效率的前提下, 选用具有较低膜层折射率的反射膜层有助于减少 Golay3 稀疏孔径光学系统的偏振像差、抑制偏振串扰, 从而提升偏振成像质量。

参考文献:

- [1] Chen J, Tian A, Chen D, et al. Super-resolution reconstruction method of the optical synthetic aperture image using generative adversarial network[J]. Open Physics, 2024, 22 (1): 20230194.
- [2] Zhang L T, Liu M, Zhao Y J, et al. The optimal design of a binaural sparse-aperture system[J]. Results in Physics, 2020, 16: 102970.
- [3] Wu Y, Hui M, Li W Q, et al. MTF improvement for optical synthetic aperture system via mid-frequency compensation[J]. Optics Express, 2021, 29(7): 10249—10264.
- [4] Chipman R A. Polarization aberration[D]. Arizona: The University of Arizona, 1987.
- [5] 罗敬, 何煦, 范阔, 等. 无遮挡离轴天文望远镜偏振像差分析

- 及其对光学椭率的影响[J]. 光学学报, 2020, 40(08): 55—64.
- Luo Jing, He Xu, Fan Kuo, et al. Polarization aberration analysis of unobscured off-axis astronomical telescopes and its influence on optical ellipticity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(08): 55—64.
- [6] Anche R M, Ashcraft J N, Haffert S Y, et al. Polarization aberrations in next-generation giant segmented mirror telescopes (GSMTs). I. Effect on the coronagraphic performance[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2023, 672: A121.
- [7] 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.
- [8] Anche R M, Haffert S Y, Ashcraft J N, et al. Estimation of polarization aberrations and their effect on the coronagraphic performance for future space telescopes[C]//*Proceedings of SPIE*. 2023, 12680: 126800R.
- [9] 李智翔, 吴泉英, 范君柳, 等. 稀疏孔径光学成像系统的偏振特性研究[J]. 光学学报, 2024, 44 (19): 191—200.
- Li Zhixiang, Wu Quanying, Fan Junliu, et al. Research on polarization characteristics of sparse aperture optical imaging systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(19): 191—200.
- [10] Ashcraft J N, Anche R M, Haffert S Y, et al. Polarization aberrations in next-generation giant segmented mirror telescopes (GSMTs). II. Influence of segment-to-segment coating variations on high-contrast imaging and polarimetry[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2025, 695: A28.
- [11] 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.
- [12] Shi H, Fan R, He C, et al. Deep learning for polarization optical system automated design[J]. *Photonics*, 2024, 11(2): 164.
- [13] Siqueiros J M, Regalado L E, Machorro R. Determination of (n, k) for absorbing thin films using reflectance measurements [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(20): 4260—4264.
- [14] Niu Z, Ding M, Jiang J, et al. Jones pupil decomposition and its lithographic imaging impacts[J]. *Applied Optics*, 2021, 60 (5): 1357—1365.
- [15] Hinefjord C. RGB IOR values for common metals[EB/OL]. 2025-03-25/[2026-04-21]. <https://chris.hinefjord.se/resources/rgb-ior-metals/>.
- [16] Qian J H, Liu H W, Liu T, et al. Piston error evaluation and correction for multi-aperture imaging system[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1775(1): 012006.
- [17] Huang A, Wu Z, Yin H, et al. Sharpness evaluation algorithm for nailfold microvascular images[J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2024, 18(2): 1515—1523.
- [18] Wei P, Wang L, Gan J, Shi X, Shang M. Incorporation of structural similarity index and regularization term into Neighbor2Neighbor unsupervised learning model for efficient ultrasound image data denoising[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14 (17): 7988.

(上接第307页)

- [19] Nasution M R A, Yoo J, Umam M K S, et al. LFCNet: Deep learning-based LiDAR-fisheye camera online automatic targetless extrinsic calibration[J]. *IEEE Access*, 2025, 13: 146305-146318.
- [20] Wang Y, Tong Y, Wang R, et al. SPTL-LCC: Single-shot, pixel-level, target-free and LiDAR-type agnostic LiDAR-camera extrinsic self-calibration[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2025, 61 (6): 17567—17583.
- [21] 史鹏涛, 危康乐, 吴昊, 等. 自动驾驶环境下基于语义分割的激光雷达与相机外参标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(24): 2428011.
- Shi Pengtao, Wei Kangle, Wu Hao, et al. LiDAR and camera extrinsic calibration method based on semantic segmentation in autonomous driving environment[J]. *Progress in Laser and Optoelectronics*, 2024, 61(24): 2428011.
- [22] Shi Pengtao. Research on targetless automatic calibration method of LiDAR and camera[J]. *Measurement*, 2026, 258 (Part A): 119002.
- [23] Wang Q, Yan C, Tan R, et al. 3D-CALI: Automatic calibration for camera and LiDAR using 3D checkerboard[J]. *Measurement*, 2022, 203: 111971.
- [24] Huang Z, Fu Y, Zhou Y, et al. DST-Calib: A dual-path, self-supervised, target-free LiDAR-camera extrinsic calibration network [EB/OL]. (2026-01-03)[2026-03-07].
- [25] Aouragh M, Gulyás L. Strict geometrically supervised calibration network using correlation cost volume[C]//*International Conference on Intelligent Computing*. Springer, 2025: 578—590.
- [26] 曹风云, 李东兴, 张华强, 等. 自适应多方向灰度形态学图像边缘检测算法[J]. 光学技术, 2016(3):5.
- Cao Fengyun, Li Dongxing, Zhang Huaqiang, et al. Adaptive multi-directional grayscale morphological image edge detection algorithm[J]. *Optical Technique*, 2016(3): 5.