

文章编号 1004-924X(2023)22-3256-10

## 双编码快照式光谱偏振成像系统偏振优化方法

王稼禹<sup>1</sup>, 史浩东<sup>1\*</sup>, 李英超<sup>1</sup>, 付强<sup>1</sup>, 王超<sup>1</sup>, 刘振伟<sup>2</sup>, 姜会林<sup>1\*</sup>

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 东北工业集团有限公司, 吉林 长春 130103)

**摘要:**针对双编码快照式光谱偏振成像系统偏振效应校正需求,提出多参量模型引导的偏振优化方法,建立基于数字微镜阵列(DMD)、棱镜-光栅-棱镜(PGP)、微偏振片阵列探测器(MPA)以及多膜层系的光谱偏振成像系统全链路偏振效应模型,分析部分偏振光入射时光谱偏振成像系统的二向衰减,揭示入射光波长、偏振度与系统偏振效应的耦合机理。通过有针对性地控制透镜的折射率、入射角,光栅折射率、常数,棱镜折射率、顶角,多层膜复折射率、膜层厚度等参量,在谱线弯曲满足重建要求的前提下实现对光谱偏振成像系统偏振效应的优化。仿真结果表明,优化后系统 SSIM>0.8、系统偏振效应相对误差<4%,与优化前相比偏振效应降低至少 6%。当入射光偏振度恒定时,系统偏振效应与波长成反比。通过实验获取单次曝光下典型材料的光谱偏振重建图像,金属偏振度相对误差提升至少 14.7%,塑料偏振度相对误差提升至少 63.6%。验证了所提偏振优化方法的必要性和可行性。本研究为双编码快照式光谱偏振成像系统多维数据的高精度获取奠定了理论基础。

**关键词:**光谱偏振成像;偏振效应;二向衰减;穆勒矩阵

**中图分类号:**O436.3 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20233122.3256

## Research on polarization optimization of dual-coded spectropolarimeter

WANG Jiayu<sup>1</sup>, SHI Haodong<sup>1\*</sup>, LI Yingchao<sup>1</sup>, FU Qiang<sup>1</sup>, WANG Chao<sup>1</sup>,

LIU Zhenwei<sup>2</sup>, JIANG Huilin<sup>1\*</sup>

(1. College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Northeast Industries Group Co., Ltd., Changchun 130103, China)

\* Corresponding author, E-mail: shihaodong08@163.com; cclgdxxkjs@163.com

**Abstract:** A multiparameter model-guided polarization optimization method is proposed for polarization effect correction of a dual-coded snapshot spectropolarimeter. A full-link polarization effect model of the spectropolarimeter based on a digital micro-mirror device (DMD), prism-grating-prism (PGP), micro-polarizer array (MPA) detector, and multi-film system is established. Bidirectional attenuation of the spectropolarimeter with incident partially polarized light is analyzed. The relationship among wavelength, polarization degree of the incident light, and polarization effect is revealed. The polarization effect of the spectropolarimeter is optimized through targeted control of the refractive index and incidence angle, grat-

收稿日期:2023-06-20;修订日期:2023-07-20.

基金项目:吉林省教育厅科学技术研究项目资助(No. JJKH20230813KJ);国家自然科学基金资助项目(No. 61890960)

ing refractive index and constant, prism refractive index and top angle, and film refractive index and film thickness when the spectral line bending meets the reconstruction requirements. The simulation results show that the structural similarity (SSIM) of the optimized system is  $>0.8$  and that the relative error of the system polarization effect is  $<4\%$ . The polarization effect is reduced by at least  $6\%$  compared with that before optimization. When the polarization of the incident light is constant, the polarization effect of the system is inversely proportional to the wavelength. The experimental acquisition of spectral polarization reconstructed images of typical materials under a single exposure improves the relative error by at least  $14.7\%$  for metal and  $63.6\%$  for plastic. The necessity and feasibility of the proposed polarization optimization method are verified. This study lays a theoretical foundation for high-precision acquisition of multidimensional data in dual-coded spectropolarimeters.

**Key words:** spectropolarimeter; polarization effect; bidirectional attenuation; Mueller matrix

## 1 引言

光谱偏振成像是一种能够获取目标光谱、偏振和空间数据立方体的成像技术,光谱偏振成像可以获取目标高对比度光谱特性,减少复杂环境的干扰。光谱偏振成像技术逐渐应用于天文观测、气象探测、环境监测、地质勘探等领域<sup>[1-3]</sup>。但目标偏振信息经光学系统折射和反射后会产生二向衰减或相位延迟等偏振效应<sup>[4-5]</sup>。从而导致偏振探测准确性下降,严重影响光谱偏振系统探测识别的能力。

近年来,国内外学者多次分析了光学系统的偏振效应。2015年,美国亚利桑那大学开发了光学设计程序 Polaris-M,分析了单独偏振波前分量,研究了各向异性光学元件在图像上的偏振特性<sup>[6]</sup>。2017年,杨斌提出了一种通道型光谱偏振成像仪的偏振校准方法及其理论模型<sup>[7]</sup>。2019年,刘铭鑫建立了偏振探测器偏振效应模型,提高了校准精度<sup>[8]</sup>。2020年,Pamba提出了一种新的偏振效应模型,该模型将光学系统的辐射定标系数和偏振特性解耦。独立地考虑和校准元件的对准误差和不同视场下延迟的变化<sup>[9]</sup>。2021年,邢文赫提出了通道型偏振光谱成像系统的偏振效应模型,建立了相位延迟器等器件全局坐标系下的穆勒矩阵,提高了光谱偏振复原精度<sup>[10]</sup>。2022年,Tian研究了  $1.1\sim 1.6\ \mu\text{m}$  波长下光栅结构对其偏振特性的影响,为分析光栅的偏振性能提供基础<sup>[11]</sup>。以上方法虽分析了不同光学系统的偏振效应,但对于计算成像中常见的光学元

件,仍缺少有效的偏振效应模型与优化方法。

针对快照式光谱偏振一体化成像需求,本文提出了一种基于数字微镜阵列(Digital Micromirror Device, DMD)、棱镜-光栅-棱镜(Prism Grating Prism, PGP)与微偏振片阵列探测器(Micro Polarizer Array, MPA)的双编码快照式光谱偏振成像系统,实现了单光路、单探测器、单次曝光获取目标光谱偏振图像<sup>[12]</sup>。但传统偏振效应建模与优化方式,面对基于像元匹配的双编码快照式光谱偏振成像系统时,偏振效应优化会影响光谱谱线弯曲,导致重建质量下降。

为此,本文提出一种双编码快照式光谱偏振成像系统的多参量模型引导偏振效应优化方法,建立了基于DMD,MPA,PGP与多层膜系的全链路偏振效应模型。分析不同入射光偏振度与波长的系统偏振效应。以系统全视场、全孔径偏振效应与重建图像结构相似性(Structural Similarity, SSIM)建立共同评价体系,实现重建图像不退化的偏振效应优化。搭建光谱偏振成像实验,获取偏振优化后光谱偏振成像。本研究可为双编码快照式光谱偏振成像系统的多维数据高精度提供理论指导。

## 2 偏振原理

### 2.1 斯托克斯矢量法

本文采用斯托克斯矢量法对光谱偏振系统的元件进行建模。斯托克斯矢量法的  $I, M, C, S$  四个参量分别为:

$$\text{Stokes} = \begin{bmatrix} I \\ M \\ C \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \\ I_R - I_L \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中:  $I$  是光束的总辐照度;  $M$  是  $0^\circ$  偏振分量减去  $90^\circ$  偏振分量;  $C$  是  $45^\circ$  偏振分量减去  $135^\circ$  偏振分量;  $S$  是右旋减去左旋偏振分量。

光在经过折射、反射与衍射后, 用穆勒矩阵来表示入射光与出射光斯托克斯矢量的关系为:

$$\begin{bmatrix} I' \\ M' \\ C' \\ S' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ M \\ C \\ S \end{bmatrix}. \quad (2)$$

光学元件的穆勒矩阵为  $M_i (i=1, 2, \dots, n)$ , 光线通过光学元件  $n$  次后出射光斯托克斯矢量为:

$$M_{\text{DMD}} = \begin{bmatrix} r_p r_p^* + r_s r_s^* & r_p r_p^* - r_s r_s^* & 0 & 0 \\ r_p r_p^* - r_s r_s^* & r_p r_p^* + r_s r_s^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_p r_p^* + r_s r_s^* & i(r_p r_p^* - r_s r_s^*) \\ 0 & 0 & i(r_p r_p^* - r_s r_s^*) & r_p r_p^* + r_s r_s^* \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中,  $r_p$  和  $r_s$  分别为金属表面对入射光的 S 光和

$$\begin{bmatrix} I' \\ M' \\ C' \\ S' \end{bmatrix} = M_n M_{n-1}, \dots, M_2 M_1 \begin{bmatrix} I \\ M \\ C \\ S \end{bmatrix}. \quad (3)$$

线偏振光偏振度 (Degree Of Linearly Polarization DOLP, 本文用字母  $P$  表示) 代表偏振光在总光强中所占的百分比, 斯托克斯矢量法把偏振度定义为:

$$P = \frac{\sqrt{M^2 + C^2}}{I}. \quad (4)$$

## 2.2 DMD 的穆勒矩阵

DMD 是可控反射铝制微镜, 根据电介质入射到金属分界面的强反射特性, 其反射波与入射波的振幅比可推导出反射镜穆勒矩阵为<sup>[13]</sup>:

$$\begin{cases} r_p = \frac{(n_{\text{DMD}}^2 + \chi^2) \cos^2 \theta_{\text{DMD}} - n_{\text{air}}^2 (N^2 + \chi'^2) + i2n_{\text{air}} \cos \theta_{\text{DMD}} [(n_{\text{DMD}}^2 - \chi^2) \chi' - 2\gamma n_{\text{DMD}} \chi]}{[(n_{\text{DMD}}^2 - \chi^2) \cos \theta_{\text{DMD}} + \gamma n_{\text{air}}]^2 + (2n_{\text{DMD}} \chi \cos \theta_{\text{DMD}} + n_{\text{air}} \chi')^2} \\ r_s = \frac{(n_{\text{air}}^2 \cos^2 \theta_{\text{DMD}} - \gamma^2) - \chi'^2 + i2\chi' n_{\text{air}} \cos \theta_{\text{DMD}}}{(n_{\text{air}} \cos \theta_{\text{DMD}} + \gamma)^2 + \chi'^2} \end{cases}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} \gamma = \sqrt{\frac{1}{2} \{ (N_{\text{DMD}})^2 - n_{\text{air}}^2 \sin^2 \theta_{\text{DMD}} + \sqrt{[(N_{\text{DMD}})^2 - n_{\text{air}}^2 \sin^2 \theta_{\text{DMD}}]^2 + 4n_{\text{DMD}}^2 \chi^2} \}} \\ \chi' = \sqrt{-\frac{1}{2} \{ (N_{\text{DMD}})^2 - n_{\text{air}}^2 \sin^2 \theta_{\text{DMD}} - \sqrt{[(N_{\text{DMD}})^2 - n_{\text{air}}^2 \sin^2 \theta_{\text{DMD}}]^2 + 4n_{\text{DMD}}^2 \chi^2} \}} \end{cases}, \quad (7)$$

其中:  $N_{\text{DMD}} = n - i\chi$  为金属的复折射率,  $i$  为虚数单位,  $\chi$  为光波在金属介质中传播的衰减;  $n_{\text{DMD}}$ ,  $n_{\text{air}}$  为 DMD 和入射介质的折射率;  $\theta_{\text{DMD}}$  为 DMD 微镜的入射角。

## 2.3 多层膜透镜的穆勒矩阵

在各向同性的界面上发生的折射和反射, 通常由 S 光和 P 光两个本征偏振态表示, 则透镜界面的穆勒矩阵为:

$$M = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} t_s + t_p & t_s - t_p & 0 & 0 \\ t_s - t_p & t_s + t_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\sqrt{t_s t_p} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\sqrt{t_s t_p} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中,  $t_s$  和  $t_p$  分别为光线 S 光和 P 光的透射率。对于多层 ( $m_c$ ) 镀膜透镜的透镜界面如图 1 所示。

如图 1 所示, 设环境 (介质 0)、薄膜 (介质 1),

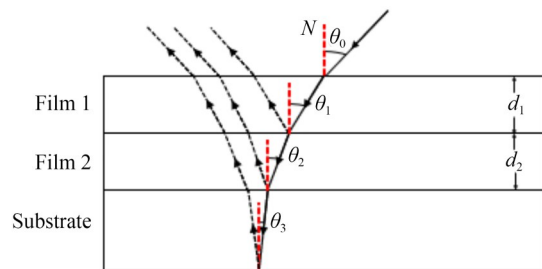


图 1 镀膜透镜的界面分布图

Fig. 1 Interface distribution diagram of coated lens

薄膜 (介质 2) 和衬底 (介质 3) 都是均匀的, 并且在光学上各向同性, 图中膜层厚度为  $d_1, d_2$ 。根据菲涅耳公式, 入射光部分在介质中反射, 部分在膜中折射, 膜内的折射光随后在边界界面处多次内反射, 每个界面处的菲涅耳反射和透射率分别由  $r_{0-1}, r_{1-2}, r_{2-3}, \dots$  和  $t_{0-1}, t_{1-2}, t_{2-3}, \dots$  表示<sup>[14]</sup>,

折射的总传输振幅由无限几何级数  $T$  表示为:

$$T = t_{0,1}t_{1,2}\cdots t_{m_c-1,m_c}e^{-i\beta} + t_{01}t_{12}\cdots t_{m_c-1,m_c} \times \\ r_{01}r_{12}, \cdots, r_{m_c-1,m_c}e^{-i3\beta} + t_{0,1}t_{1,2}, \cdots, \\ t_{m_c-1,m_c} \times r_{1,0}^2r_{1,2}^2, \cdots, r_{m_c-1,m_c}^2e^{-i5\beta} + \cdots = \\ \frac{t_{01}t_{12}\cdots t_{m_c-1,m_c}e^{-i\beta}}{1 + r_{01}r_{12}\cdots r_{m_c-1,m_c}e^{-i2\beta}}, \quad (9)$$

$$\beta = \sum_{j=1}^{m_c} 2\pi \left( \frac{d_j}{\lambda_j} \right) N_j \cos \theta_j, \quad (10)$$

其中:  $\lambda_j$  为对应波长,  $d_j$  为对应膜层厚度,  $N_j$  为对应膜层的复折射率。

所以多层膜  $m_c$  的 S 光和 P 光的透过率为<sup>[15]</sup>:

$$\begin{cases} t_p = \frac{\sum t_{p(m_c-1,m_c)} e^{-i\beta}}{1 + \sum r_{p(m_c-1,m_c)} e^{-i\beta}} \\ t_s = \frac{\sum t_{s(m_c-1,m_c)} e^{-i\beta}}{1 + \sum r_{s(m_c-1,m_c)} e^{-i2\beta}} \end{cases}, \quad (11)$$

其中:

$$\begin{cases} t_{p(m_c-1,m_c)} = \frac{2N_{m_c-1} \cos \theta_{m_c-1}}{N_{m_c} \cos \theta_{m_c-1} + N_{m_c-1} \cos \theta_{m_c}} \\ r_{p(m_c-1,m_c)} = \frac{N_{m_c} \cos \theta_{m_c-1} - N_{m_c-1} \cos \theta_{m_c}}{N_{m_c} \cos \theta_{m_c-1} + N_{m_c-1} \cos \theta_{m_c}} \\ t_{s(m_c-1,m_c)} = \frac{2N_{m_c-1} \cos \theta_{m_c-1}}{N_{m_c-1} \cos \theta_{m_c-1} + N_{m_c} \cos \theta_{m_c}} \\ r_{s(m_c-1,m_c)} = \frac{N_{m_c-1} \cos \theta_{m_c-1} - N_{m_c} \cos \theta_{m_c}}{N_{m_c-1} \cos \theta_{m_c-1} + N_{m_c} \cos \theta_{m_c}} \end{cases}. \quad (12)$$

将式(11)~式(12)带入式(8),即可得出多层膜透镜的穆勒矩阵。

## 2.4 PGP 穆勒矩阵

对于 PGP 的穆勒矩阵,由公式(3)偏振元件的叠加特性有:

$$\mathbf{M}_{\text{PGP}} = \mathbf{M}_{P1} \mathbf{M}_G \mathbf{M}_{P2}, \quad (13)$$

其中:  $\mathbf{M}_{\text{PGP}}$  代表 PGP 的穆勒矩阵,  $\mathbf{M}_{P1}$ ,  $\mathbf{M}_{P2}$  分别代表棱镜 1 与棱镜 2 的穆勒矩阵,  $\mathbf{M}_G$  代表光栅的穆勒矩阵。

对于光栅的穆勒矩阵,通过模拟光栅的矢量传输特性<sup>[15]</sup>,PGP 中的工作原理如图 2 所示。

垂直于光栅的入射光电矢量会透过,而平行于线栅的偏振光被光栅反射,则光栅中光线 S 光和 P 光的透过率为:

$$\begin{cases} t_s^G = \frac{4n_G^2 A^2}{1 + n_G^2 A^2} \\ t_p^G = \frac{4n_G^2 B^2}{1 + n_G^2 B^2} \end{cases}, \quad (14)$$

其中:  $n_G$  为光栅基底材料的折射率,  $A$  与  $B$  表达如式(15)所示:

$$\begin{cases} A = \frac{\lambda}{4d} \left( \ln(\sqrt{2}) + \frac{\frac{1}{4}((1-(d/\lambda)^2)^{-\frac{1}{2}} - 1)}{1 + ((1-(d/\lambda)^2)^{-\frac{1}{2}} - 1)} + \frac{(d/\lambda)^2}{1024} \right) \\ B = \frac{d}{\lambda} \left( \ln(\sqrt{2}) + \frac{\frac{1}{4}((1-(d/\lambda)^2)^{-\frac{1}{2}} - 1)}{1 + \frac{1}{4}((1-(d/\lambda)^2)^{-\frac{1}{2}} - 1)} + \frac{(d/\lambda)^2}{1024} \right) \end{cases}. \quad (15)$$

对于棱镜,将等式(8)中的单次折射光线的 S 光和 P 光的透过率  $t_s, t_p$  替换为<sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} t_p^p = \frac{\sqrt{4n_p \cos \theta_i (1 - n_p^2 \sin^2 \theta_i)}}{(n_p^2 + 1) - (n_p^4 + 1) \sin^2 \theta_i + \sqrt{2n_p \cos \theta_i (1 - n_p^2 \sin^2 \theta_i)}} \\ t_s^p = \frac{\sqrt{4n_p \cos \theta_i (1 - n_p^2 \sin^2 \theta_i)}}{1 + n_p^2 \cos 2\theta_i + \sqrt{2n_p \cos \theta_i (1 - n_p^2 \sin^2 \theta_i)}} \end{cases}, \quad (16)$$

其中:  $n_p$  为棱镜的折射率,  $\theta_i$  为棱镜中波长对应的折射角。因为光栅和棱镜是透射形式,所以我

们选用透射形式的穆勒矩阵,联立等式(8)与式(14)~式(16),即可求得 PGP 的穆勒矩阵。

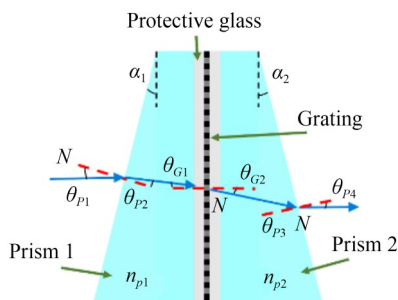


图 2 PGP 的工作原理

Fig. 2 Working principle of PGP

### 2.5 MPA 探测器穆勒矩阵

MPA 探测器是在传感器焦平面上集成像素级不同方向的微偏振片,单个微偏振片的穆勒矩阵可以表示为:

$$\mathbf{M}_{\text{MPA}} = t_d^2 \begin{bmatrix} 1 + \epsilon^2 & 1 - \epsilon^2 & 0 & 0 \\ 1 - \epsilon^2 & 1 + \epsilon^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\epsilon & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\epsilon \end{bmatrix}, \quad (17)$$

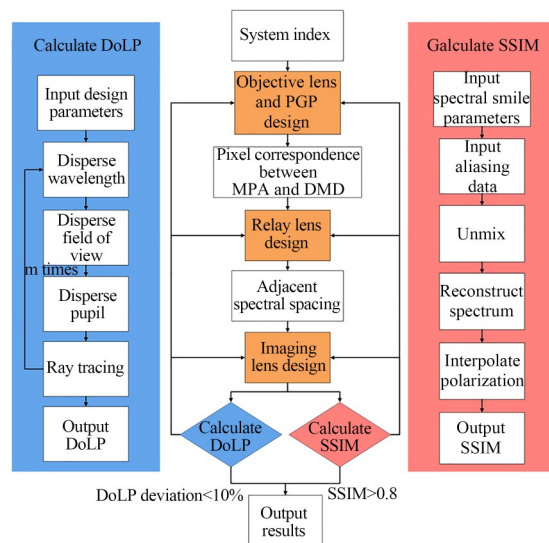
其中:  $t_d$  代表微偏振片方向的最大透过率,常用的微偏振片角度为  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  和  $135^\circ$ 。  $\epsilon$  代表相应方向的消光比。

利用双编码快照式光谱偏振成像系统全链路偏振效应模型可确定光学系统偏振敏感界面,通过降低透镜的入射角与折射角差值;降低光栅常数;降低棱镜的顶角;减小膜层厚度;都可以抑制界面的偏振效应。

## 3 仿真与优化

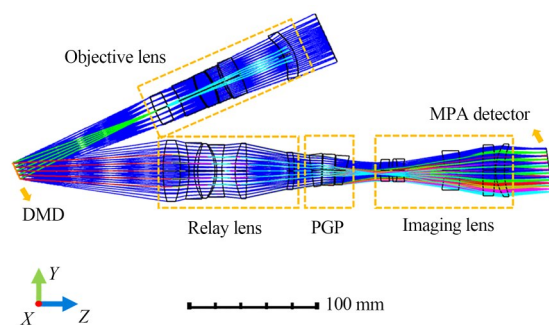
### 3.1 多参量模型引导的偏振优化方法

本文中,多参量模型引导的偏振优化方法利用各个界面的波长、视场、光瞳的偏振效应矩阵,优化出射光偏振度,使其与入射光偏振度相同。同时利用系统的谱线弯曲与重建图像 SSIM 的耦合关系,保证重建图像质量。其具体流程如图 3(a)所示。第一步,根据成像的具体指标要求设计物镜与 PGP;第二步,根据 MPA 与 DMD 的像元(微镜)尺寸的缩放要求,设计中继镜;第三步,根据光谱混叠信息经过 PGP 色散后成像到 MPA 探测器的相邻光谱间隔,设计成像镜;第四步,计算系统的偏振效应与重建图像的 SSIM。因为系统中元件的穆勒矩阵都可以得到,所以偏振效应敏感的界面可以轻松得知。当出射光偏振度百



(a) 偏振优化过程

(a) Polarization-maintaining optimization method



(b) 系统结构

(b) System structure

图 3 基于双重评价的偏振优化方法与系统结构

Fig. 3 Dual-evaluation based polarization-maintaining optimization method and system structure

分比大于 10%, 或  $\text{SSIM} < 0.8$ , 则退回偏振效应或 SSIM 敏感的器件重新迭代。最终, 满足要求的即是双编码光谱偏振系统的解。优化后系统结构如图 3(b)所示。

### 3.2 光学系统偏振效应优化

本文选择 400 nm, 500 nm 和 600 nm 波段下的  $P_{\text{in}} = 0.1, 0.4$  和  $0.7$  入射光偏振度进行仿真。偏振优化前后的偏振效应如图 4~图 6 所示。

图 4~图 6 代表着不同波长与入射光偏振度  $P_{\text{in}}$  对应的出射光偏振度  $P_{\text{out}}$ ,  $X$  和  $Y$  轴分别对应整个系统的  $X$  方向视场与  $Y$  方向视场。  $P_{\text{out}} = P_{\text{in}}$  时, 代表系统的无偏振效应。在入射光偏振度  $P_{\text{in}}$  方面, 当  $\lambda = 400 \text{ nm}$ ,  $P_{\text{in}} = 0.1$  时,  $P_{\text{out}}$  优化后由

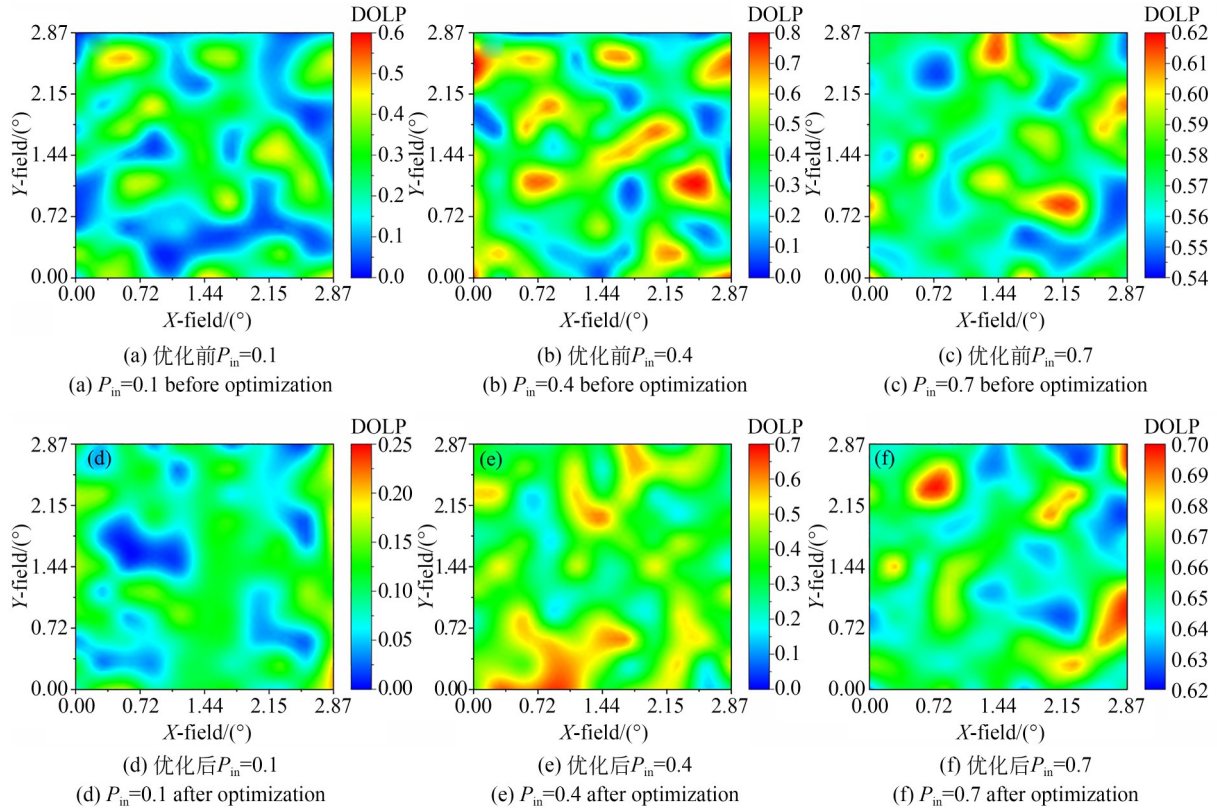


图 4 400 nm 偏振度变化

Fig. 4 Change of DOLP at 400 nm

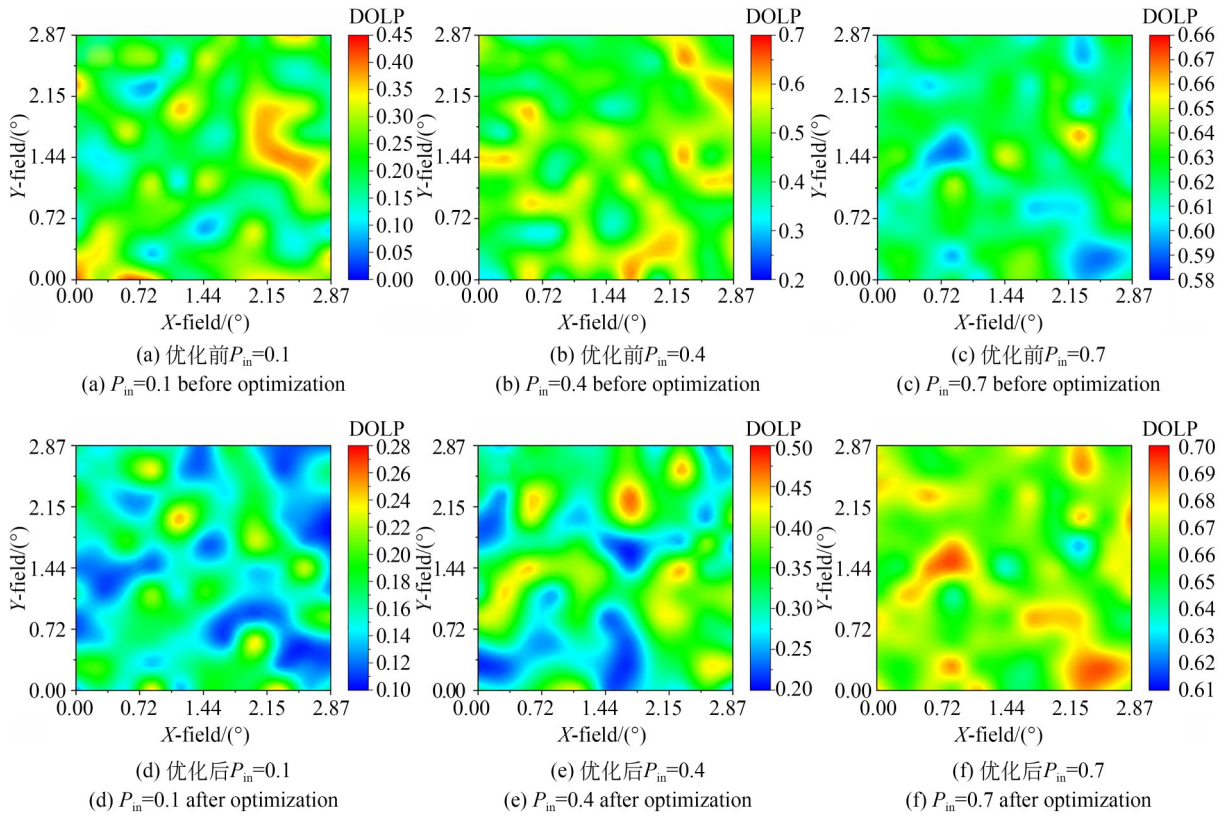


图 5 500 nm 的偏振变化

Fig. 5 Change of DOLP at 500 nm

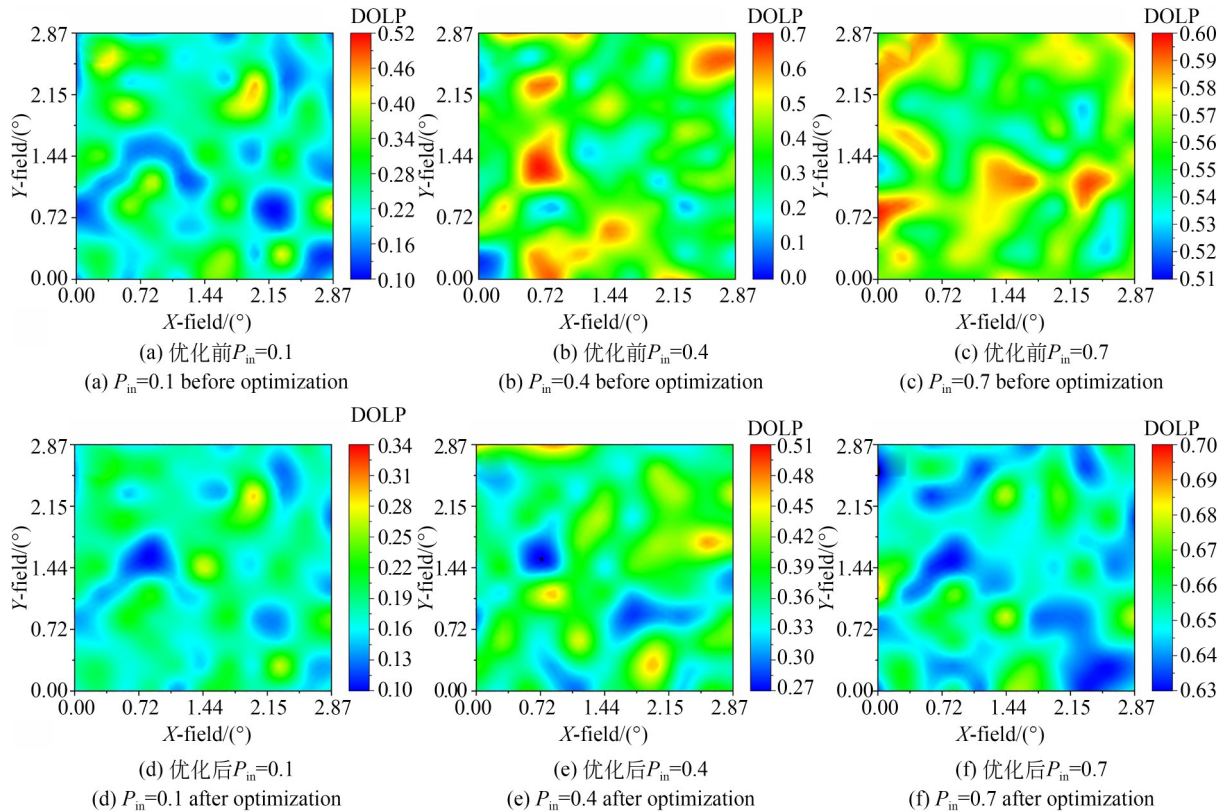


图 6 600 nm 的偏振变化

Fig. 6 Change of DOLP at 600 nm

0.199 变为 0.096, 精度提升 95%; 当  $P_{in} = 0.4$  时,  $P_{out}$  优化后由 0.326 变为 0.387, 精度提升 15.3%。  $P_{in} = 0.7$ ,  $P_{out}$  优化后由 0.593 变为 0.692, 精度提升 14.1%。 由此可知, 在入射光波长  $\lambda$  不变的情况下, 随着  $P_{in}$  的增大, 系统的偏振效应越来越小。 在  $P_{in}$  较低的时候, 系统会产生起偏。 在  $P_{in}$  较大的时候, 系统会产生消偏。 在波长  $\lambda$  方面, 当  $P_{in} = 0.4$ ,  $\lambda = 500$  nm 时,  $P_{out}$  优化后由 0.347 变为 0.383, 精度提升 9%;  $\lambda = 600$  nm 时,  $P_{out}$  优化后由 0.366 变为 0.391, 精度提升 6%。 由此可知, 系统的偏振效应随着波长的增大而减小。 经过优化前后对比可知, 多参量模型引导的偏振优化方法可以有效降低系统偏振效应。

## 4 测量实验与结果

### 4.1 实验平台的搭建

本文中选用白色塑料、黑色金属、黑色塑料

与红色金属作为目标。 对待测目标单次曝光成像, 对比其优化前后偏振效应与 SSIM。 图 7(a) 为双编码快照式光谱偏振成像系统, 图 7(b) 为地面真值。 编码孔径选择 DMD (德州仪器

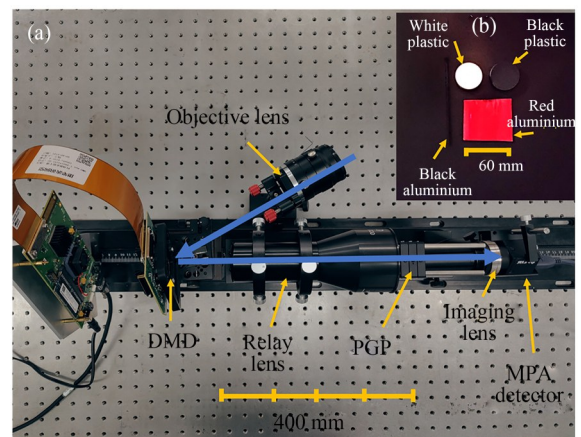


图 7 实验场景: 双编码快照式光谱偏振成像系统(a)和地面真值(b)

Fig. 7 Experimental scenario: Dual-coded spectropolarimeter(a) and Ground truth(b)

DLP6500),分辨率为 $1\,920\times1\,080$ ,微镜大小为 $7.65\,\mu\text{m}\times7.65\,\mu\text{m}$ 。探测器为微偏振片阵列探测器(Flir Blackfly BFS-U3-123S6C-C),像素大小为 $3.45\,\mu\text{m}$ ,分辨率为 $4\,120\times3\,000$ 。

4.2 分析与结果

在重建后的光谱偏振度图像选取 400 nm, 500 nm 和 600 nm 的光谱偏振度图像如图 8 所示。其中,图 8(a)~8(c)为系统优化前的光谱偏振图像,图 8(d)~8(f)为系统优化后的光谱偏振图像。

由图可知,重建后图片的 SSIM 均大于 0.8。通过对比同一波长的优化前后偏振度变化可以发现。图 8(a)~8(c)中,优化前金属偏振特性较好,导致不同波段下退偏较大,而塑料偏振特性较差,但系统引入了较多偏振。白色塑料表面非常光滑,所以偏振特性更多的体现在边缘信息。优化前后多次测量的目标的偏振度均值见表 1~表 4 所示。标准值为偏振态测量仪(索雷博 PAX1000VIS(/M);400~700 nm)多次测量平均目标偏振度。

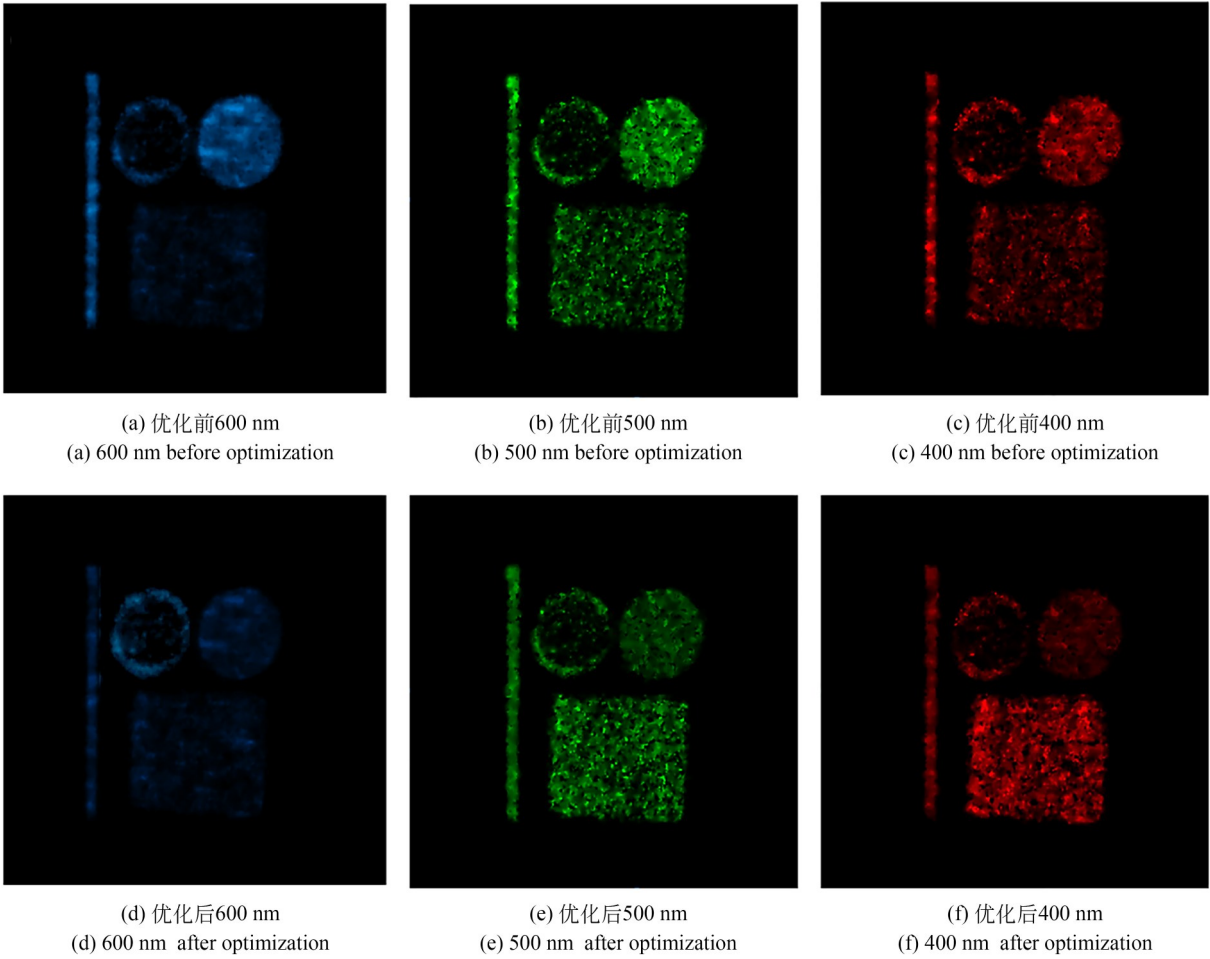


图8 重建的光谱偏振度图像  
Fig.8 Reconstructed spectral polarization image

由此可知,优化后重建的黑色金属偏振度优于4.92%,至少提升6.04%,白色塑料偏振度相对误差优于7.19%,至少提升37.7%。黑色塑料偏振度相对误差优于3.39%,至少提升63.6%,红色金属偏振度相对误差优于6.15%,至少提升

14.7%。通过比较可知,目标的偏振度主要受目标材质影响,相同材质的偏振度相近。目标颜色会影响目标响应波长的偏振度。波长 $\lambda$ 越短,偏振优化效果越好。入射光偏振度 $P_{in}$ 越小,偏振优化效果越好。由此得出,元件偏振效应模型的建

表 1 黑色金属杆的偏振度变化

Tab. 1 DOLP change of black ferrous rod

| 波长/nm | 优化前   | 优化后   | 标准值   | 相对误差变化 |
|-------|-------|-------|-------|--------|
| 600   | 0.686 | 0.599 | 0.617 | 8.26%  |
| 500   | 0.698 | 0.598 | 0.629 | 6.04%  |
| 400   | 0.669 | 0.586 | 0.602 | 8.47%  |

表 2 白色圆塑料的偏振度变化

Tab. 2 DOLP change of white round plastic

| 波长/nm | 优化前   | 优化后   | 标准值   | 相对误差变化 |
|-------|-------|-------|-------|--------|
| 600   | 0.616 | 0.430 | 0.454 | 39.20% |
| 500   | 0.635 | 0.426 | 0.459 | 37.70% |
| 400   | 0.624 | 0.421 | 0.451 | 39.90% |

表 3 黑色圆塑料的偏振度变化

Tab. 3 DOLP change of black round plastic

| 波长/nm | 优化前   | 优化后   | 标准值   | 相对误差变化 |
|-------|-------|-------|-------|--------|
| 600   | 0.719 | 0.422 | 0.418 | 71.00% |
| 500   | 0.711 | 0.438 | 0.429 | 63.60% |
| 400   | 0.692 | 0.426 | 0.412 | 67.00% |

表 4 红色金属的偏振度变化

Tab. 4 DOLP change of red square metal

| 波长/nm | 优化前   | 优化后   | 标准值   | 相对误差变化 |
|-------|-------|-------|-------|--------|
| 600   | 0.525 | 0.620 | 0.645 | 14.70% |
| 500   | 0.494 | 0.602 | 0.619 | 17.40% |
| 400   | 0.340 | 0.580 | 0.618 | 18.70% |

## 参考文献:

- [1] EL-HABASHI A, BOWLES J, FOSTER R, *et al.* Polarized observations for advanced atmosphere-ocean algorithms using airborne multi-spectral hyper-angular polarimetric imager[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2021, 262: 107515.
- [2] HSIANG E L, WU S T. Novel developments in computational spectropolarimeter [J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12: 52.
- [3] 张颖, 李河申, 王昊, 等. 基于神经网络的典型地物的偏振多光谱图像分类(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(6): 7-14.
- ZHANG Y, LI H S, WANG H, *et al.* Polarized multispectral image classification of typical ground objects based on neural network(Invited)[J]. *Infra-*

立、光谱偏振系统的偏振优化方法可以提升系统的双编码光谱偏振系统的偏振探测准确度。

## 5 结 论

本文针对双编码快照式光谱偏振成像系统偏振效应校正方法的空缺,提出了一种多参量模型引导的偏振优化方法。建立了基于部分偏振光的系统全链路偏振效应模型。揭示了不同入射光偏振度、波长与系统偏振效应的关系。研究表明,控制透镜的入射角、折射率;光栅的折射率、光栅常数;棱镜的折射率、顶角;多层膜复折射率、膜层厚度,以系统全视场、全孔径偏振效应与重建图像结构相似性(SSIM)建立共同评价体系,实现重建质量不退化的偏振效应优化。仿真结果表明,优化后系统 SSIM>0.8、系统偏振效应相对误差<4%,与优化前相比偏振效应降低至少 6%,偏振效应优化效果与波长成反比。搭建了光谱偏振成像实验,对比了偏振优化前后的光谱偏振成像结果。实验结果表明,偏振优化后的重建后图片 SSIM 仍大于 0.8。经过偏振优化,金属偏振度相对误差提升至少 14.7%,塑料偏振度相对误差提升至少 63.6%。证明了优化理论与方法的可行性,为光谱偏振系统的偏振效应分析与偏振优化提供理论与思路。

*red and Laser Engineering*, 2022, 51(6): 7-14. (in Chinese)

- [4] 张艺蓝, 史浩东, 王超, 等. 基于自由曲面的空间光学系统偏振像差分析[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(12): 2783-2796.
- ZHANG Y L, SHI H D, WANG C, *et al.* Analysis of polarization aberration of space optical system based on freeform surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(12): 2783-2796. (in Chinese)
- [5] 李刚, 孙连春, 于兆波, 等. 光学薄膜中的偏振效应[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(6): 647-651.
- LI G, SUN L C, YU Z B, *et al.* Polarization effects in optical thin films[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(6): 647-651. (in Chinese)
- [6] CHIPMAN R A, LAM W S T. The Polaris-M ray tracing program[C]. *SPIE Optical Engineering + Applications. Proc SPIE* 9613, *Polarization Sci-*

- ence and Remote Sensing VII, San Diego, California, USA. 2015, 9613: 139-156.
- [7] 杨斌, 颜昌翔, 张军强, 等. 多通道型偏振成像仪的偏振定标[J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1126-1134.  
YANG B, YAN C X, ZHANG J Q, *et al.* Polarimetric calibration of multi-channel polarimetric imager[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(5): 1126-1134. (in Chinese)
- [8] LIU M X, ZHANG X, LIU T, *et al.* On-orbit polarization calibration for multichannel polarimetric camera[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(7): 1424.
- [9] PAMBA A, THILAK V, VOELZ D G, *et al.* Estimation of incidence and reflection angles from passive polarimetric imagery: extension to out-of-plane scattering[C]. *Optical Engineering+Applications. Proc SPIE 6682, Polarization Science and Remote Sensing III, San Diego, California, USA.* 2007, 6682: 217-223.
- [10] 邢文赫. 通道色散型偏振光谱成像系统偏振辐射标定研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.  
XING W H. *Research on Polarimetric and Radiometric Calibration of Channeled Dispersion Imaging Spectropolarimeter*[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)
- [11] TIAN S Q, LIU T, PAN X H, *et al.* Study of structural effects on the polarization characteristics of subwavelength metallic gratings in short infrared wavelengths[J]. *Optics Express*, 2022, 30(26): 47983.
- [12] WANG J Y, SHI H D, LIU J N, *et al.* Compressive space-dimensional dual-coded hyperspectral polarimeter (CSDHP) and interactive design method[J]. *Optics Express*, 2023, 31(6): 9886.
- [13] 廖廷彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 45-63.  
LIAO Y B. *Polarization Optics*[M]. Beijing: Science Press, 2003: 45-63. (in Chinese)
- [14] AZZAM R M A, BASHARA N M, THORNBURN BURNS D. Ellipsometry and polarized light[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1987, 199: 283-284.
- [15] PANG Y, ZHANG Y, YANG H, *et al.* Reduction of the polarization sensitivity of grating-based spectrometer using an achromatic quarter-wave plate[J]. *Optics Communications*, 2017, 393: 139-142.
- [16] AZZAM R A, ADAMS R M. Transmission of p- and s-polarized light through a prism and the condition of minimum deviation[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2010, 27(9): 2085-2090.

## 作者简介:



王稼禹(1993—),男,吉林长春人,博士研究生,2016年于长春理工大学获得学士学位,2019年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事计算光谱偏振成像、光学设计、偏振像差等方面的研究。E-mail: 515610926@qq.com

## 通讯作者:



姜会林(1945—),男,辽宁辽中人,1981于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位;1987于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,2015年当选为中国工程院院士,曾任长春理工大学校长,现任校学术委员会主任,兼任中国兵工学会副理事长、中国光学学会和中国光学工程学会常务理事、中央军委科学技术委员会航天领域专家委员会成员、长春光机所应用光学国家重点实验室学术委员会副主任等职务,长期从事应用光学技术研究。E-mail: cclgdxkjs@163.com

## 通讯作者:



史浩东(1989—),男,吉林长春人,副研究员,博士生导师,2012年于长春理工大学获得学士学位,2017年于长春理工大学获得博士学位,主要从事光学系统设计、偏振光谱探测、自由曲面成像技术研究。E-mail: shihaodong08@163.com