

基于渥拉斯顿棱镜的单路实时偏振成像系统设计

许洁 刘飞 刘杰涛 王娇阳 韩平丽 周淙浩 邵晓鹏

A design of real-time unipath polarization imaging system based on Wollaston prism

Xu Jie Liu Fei Liu Jie-Tao Wang Jiao-Yang Han Ping-Li Zhou Cong-Hao Shao Xiao-Peng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 134201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.134201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.134201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I13>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于拉锥结构的全光纤型内窥 OCT 探针研究

[Tapered structure based all-fiber probe for endoscopic optical coherence tomography](#)

物理学报.2016, 65(2): 024201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024201>

基于界面信号的扫频光学相干层析成像系统相位矫正方法

[Phase correction method based on interfacial signal in swept source optical coherence tomography](#)

物理学报.2016, 65(1): 014201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014201>

超高分辨光学相干层析成像技术与材料检测应用

[Ultrahigh-resolution optical coherence tomography and its application in inspection of industrial materials](#)

物理学报.2015, 64(17): 174201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.174201>

二级级联式室内可见光通信光学接收天线设计

[Design of two-cascade optical antenna for indoor visible light communication](#)

物理学报.2015, 64(16): 164201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164201>

隔行分层填充的太赫兹超高双折射多孔光纤

[Ultrahigh birefringence terahertz porous fibers based on interlacing layered infiltration method](#)

物理学报.2015, 64(15): 154201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154201>

# 基于渥拉斯顿棱镜的单路实时偏振成像系统设计\*

许洁<sup>1)</sup> 刘飞<sup>1)</sup> 刘杰涛<sup>1)</sup> 王骄阳<sup>1)</sup> 韩平丽<sup>1)</sup> 周淙浩<sup>2)</sup> 邵晓鹏<sup>1)†</sup>

1) (西安电子科技大学物理与光电工程学院, 西安 710071)

2) (东北大学计算机科学与工程学院, 沈阳 110004)

(2016年1月30日收到; 2016年4月27日收到修改稿)

针对非实时成像中动态场景偏振探测产生的虚假偏振信息问题, 充分利用渥拉斯顿棱镜的分光特性, 设计了一种新型实时偏振成像系统. 采用像方远心望远透镜系统、准直透镜系统并设计匹配的成像镜系统, 在单探测器阵列上同时获取偏振态相互垂直的两幅偏振图像. 通过全系统联动设计与优化, 系统的调制传递函数在截止频率处不小于0.55, 全系统弥散斑均方根半径小于 $5.3\ \mu\text{m}$ , 即小于探测器像元尺寸, 满足成像设计要求. 仿真结果证明该成像系统可有效解决传统分振幅偏振成像系统的实时性差的不足, 分孔径偏振成像系统的能量利用率和分辨率低的问题以及偏振焦平面方法中光路串扰的缺陷, 应用前景广阔.

**关键词:** 偏振成像, 渥拉斯顿棱镜, 像方远心, 单探测器

**PACS:** 42.15.Eq, 42.25.Ja, 42.15.Fr, 42.25.Lc

**DOI:** 10.7498/aps.65.134201

## 1 引言

近年来, 偏振成像技术发展迅速, 在天文观测<sup>[1]</sup>、生物组织检测与医学<sup>[2,3]</sup>、大气环境与海洋检测<sup>[4]</sup>、遥感<sup>[5]</sup>、水下观测等<sup>[6]</sup>方面具有广阔的应用前景. 此外, 由于其在去除雾、霾对成像的影响方面的特殊作用, 可增大系统成像探测的工作距离<sup>[7]</sup>, 扩展系统的使用条件与功能效力, 增强系统环境适应性<sup>[8,9]</sup>. 传统的偏振成像技术主要有三种分偏振方式: 1) 旋转偏振片方式(即分振幅方式); 2) 光路分光方式(分孔径方式); 3) 偏振焦平面成像方式. 虽然这几种方法很好地实践了偏振成像理念, 但存在实时性不足、能量利用率低、结构复杂等缺陷. 分振幅方式操作简单, 但目标多个偏振分量图像必须在相同的条件下获得; 成像结果的正确性依赖于成像过程中目标和位置的稳定性以及环境辐射特征不变性; 该系统在实际应用中, 会引入误差甚至虚假偏振信息<sup>[10-12]</sup>. 分孔径方式复杂度高、偏振参数多、计算公式复杂, 且系统对噪声敏感, 易引入较

大的误差<sup>[13,14]</sup>. 采用偏振焦平面成像的方式中偏振焦平面的制作工艺复杂、价格昂贵, 易引起相邻光路串扰, 对后期图像处理算法提出较高要求<sup>[15]</sup>. 除常见的传统偏振成像技术外, Weijiers等曾提出一种基于萨伐尔偏光镜的成像系统<sup>[16]</sup>, 该成像系统采用单路偏振成像方式, 可实时获取同一场景的两幅偏振图像, 解决传统偏振成像系统实时性不足的缺陷, 但存在固有缺陷, 即像散严重.

为弥补上述偏振成像技术的不足, Bènière等<sup>[17]</sup>致力于研究新型实时单通道偏振成像技术(即通过一次曝光获得目标即时偏振分量图像), 考虑到探测目标具有一定的光谱宽度, 偏振成像系统要求能够适用于较宽的光谱范围, 但是其非联动设计存在竖直方向畸变大的问题. 针对动态目标实时、高分辨率的偏振成像探测要求, 本文利用单通道偏振成像理论设计一种以渥拉斯顿棱镜为分光元件的新型实时偏振成像系统, 主要包括前置望远物镜、准直镜、渥拉斯顿棱镜、成像镜以及探测器等五部分, 在探测器上同时获取上下两幅偏振方向垂直的图像, 全系统的联动设计解决竖直方向畸变

\* 国家自然科学基金(批准号: 61575154)和中国国防科技预研项目(批准号: 90406150009)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xpsbao@xidian.edu.cn

大的问题, 为后期图像处理提供更丰富的细节信息. 本文在简述系统设计原理的基础上, 给出全系统的设计方案, 并模拟系统的偏振成像效果, 分析证明该系统具有较强的偏振分光能力和完善的成像特性.

## 2 偏振光学成像系统原理介绍

新型实时偏振成像系统由五部分组成: 前置望远物镜、准直镜、渥拉斯顿棱镜 (Wollaston prism, WP)、成像镜以及探测器. 如图 1 所示. 目标通过前置望远物镜成像在一次像面, 再经准直镜的准直作用转换成准直光束并入射到 WP, 最后通过成像镜将两种偏振态的光束会聚并成像在探测器靶面上.

场景辐射在 L1 的焦平面成像, L2 是 L1 的倒置

设计; L1 的像经过 L2 后变为准直光线出射, 经过 WP 和 L3 后, 在探测器的高度方向形成  $0^\circ$  和  $90^\circ$  的上下两幅偏振图像; 由于 WP 特殊的分光作用, 通过一次曝光即可获得 2 幅同一场景、不同偏振状态的图像, 系统复杂度低、能量利用率高.

WP 作为新型实时偏振成像系统的主要组成部分, 能够使两种相互垂直的偏振态光束产生一定离散角并同时出射<sup>[18]</sup>, 如图 2 所示. 正入射的平行光束在棱镜 ABC 内沿垂直光轴方向传播, o 光和 e 光以不同的相速度同向传播; 在入射到 AC 面上时, 由于光轴方向旋转  $90^\circ$ , 原来的 o 光变成 e 光, 且由于负单轴晶体的作用, 将远离界面法线偏折; ABC 棱镜内的 e 光变成 o 光, 靠近界面法线偏折. 两束光在传输到 CD 面上时, 将再偏折一次, 在 CD 平面后这两种偏振状态的光对称地分开一个角度  $\Phi$ , 即离散角.

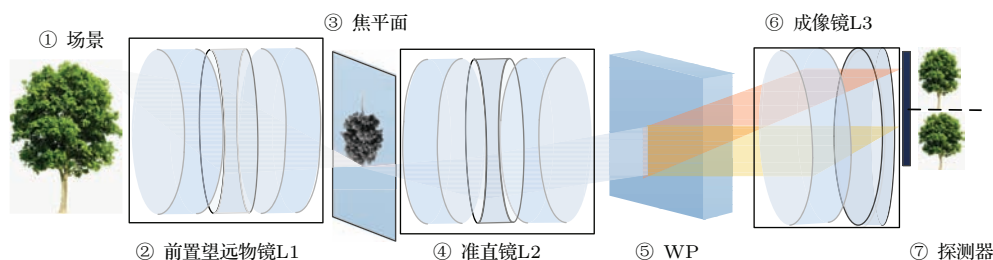


图 1 (网刊彩色) 光学成像系统原理图

Fig. 1. (color online) The principle diagram of the optical system.

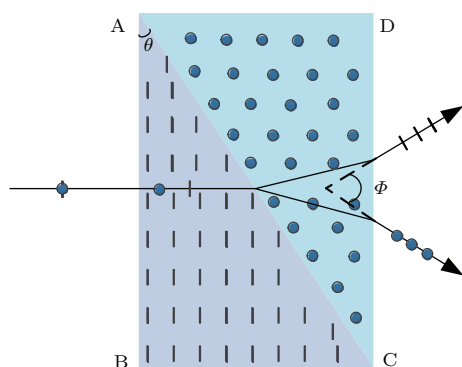


图 2 (网刊彩色) WP 分光示意图

Fig. 2. (color online) The schematic diagram of WP.

离散角  $\Phi$  与棱镜材料及楔角的关系如下式:

$$\Phi \approx 2 \arcsin[(n_o - n_e) \tan \theta], \quad (1)$$

其中  $\Phi$  表示 CD 平面后两种偏振状态光对称分开的角度,  $n_o$ ,  $n_e$  分别表示 o 光和 e 光在棱镜中的折射率,  $\theta$  表示 WP 的楔角.

## 3 偏振成像光学系统设计

系统要求成像波段范围: 可见光波段, 物镜焦距 50 mm, 成像所用探测器以安森美半导体公司的 KAI1050 探测器为例, 像元尺寸  $55 \mu\text{m}$ , 像元数  $1024 \times 1024$ .

### 3.1 前置望远物镜设计

全系统的关键在于光线通过准直镜后能准直地通过 WP, 故 L1 采用像方远心的设计, 出瞳位于无限远, 各视场出射光束的主光线平行于光轴, 降低光学配准的难度. 考虑到完全对称结构可以自动彗差校正、畸变和垂轴色差, 故 L2 采用 L1 的倒置设计<sup>[19]</sup>. L1 的初始参数如表 1 所示, 对初始结构进行优化获得最终结果.

表 1 初始参数表  
Table 1. The table of initial parameters.

| 面  | 半径/mm | 厚度/mm | 玻璃      | 半高/mm |
|----|-------|-------|---------|-------|
| 1  | 84.0  | 5.8   | KF9     | 8.3   |
| 2  | 26.5  | 18.2  |         | 7.3   |
| 3  |       | 3.8   |         | 6.1   |
| 4  | 42.1  | 11.9  | LAKN12  | 7.1   |
| 5  | -84.1 | 10.6  |         | 7.6   |
| 6  | 24.1  | 10.3  | N-PSK57 | 8.0   |
| 7  | -28.1 | 10.1  | KAFS12  | 7.1   |
| 8  | 12.0  | 13.4  |         | 6.0   |
| 9  | 44.6  | 8.9   | LAFN23  | 9.6   |
| 10 | -13.2 | 7.7   | KZFS1   | 9.8   |
| 11 | -52.4 | 10.8  |         | 10.0  |
| 像  |       |       |         | 8.9   |

图 3 所示为 L1 初始调制传递函数 (MTF) 曲线图, 优化之后的 L1 成像 MTF 曲线, 如图 4 (a) 所示. 在频率 45 lp/mm, MTF 曲线值达到 0.7, 且全波段 MTF 曲线趋势一致, 接近衍射极限, 成像效果良好; 场曲与畸变如图 4 (b) 所示, 场曲值在 0.1 mm 范围以内, 畸变在 0.5% 以内, L1 场曲与畸变值在光学系统设计中控制在有效范围内; 优化后的点列图如图 4 (c) 所示, 全波段的 RMS 最大值为 4.8 μm, 小于选定探测器的像元尺寸 5.5 μm.

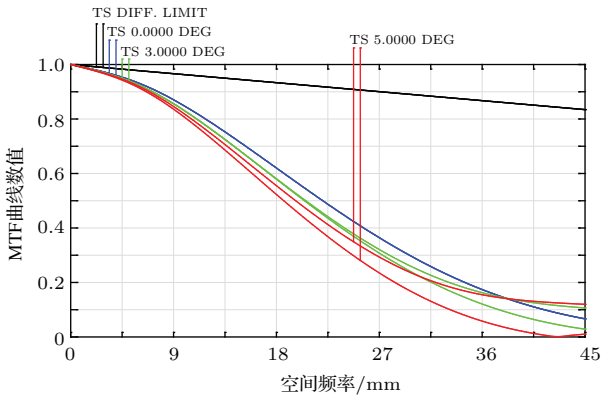


图 3 (网刊彩色) L1 初始 MTF 曲线图  
Fig. 3. (color online) The initial MTF curve of L1.

$\rho_1 = r_1 - r_0,$  (2)

$\rho_2 = r_2 - r_0,$  (3)

$\rho_3 = r_3 - r_0,$  (4)

$\vdots$   
 $\rho_n = r_n - r_0,$  (5)

$\text{RMS} = \sqrt{\rho_1^2 + \rho_2^2 + \rho_3^2 + \cdots + \rho_n^2},$  (6)

$r_0$  表示理想成像的艾里斑半径中心点的坐标,  $r_1, r_2, r_3, \cdots, r_n$  分别表示弥散斑上各个点的坐标, RMS 半径指系统弥散斑均方根半径. 因此, 优化之后的 L1 的成像效果满足设计要求.

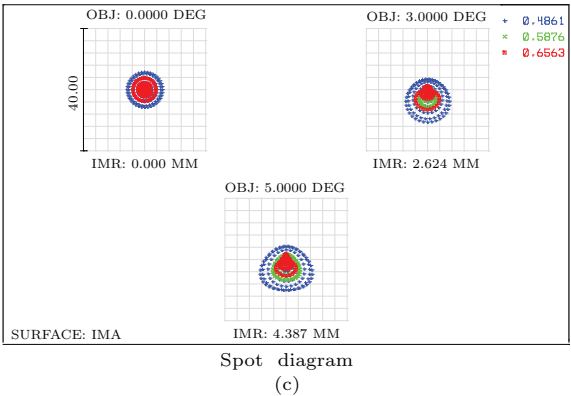
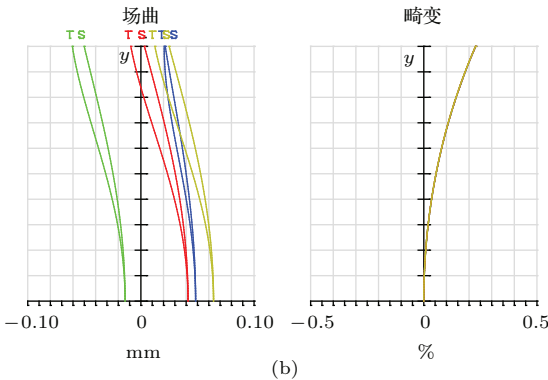
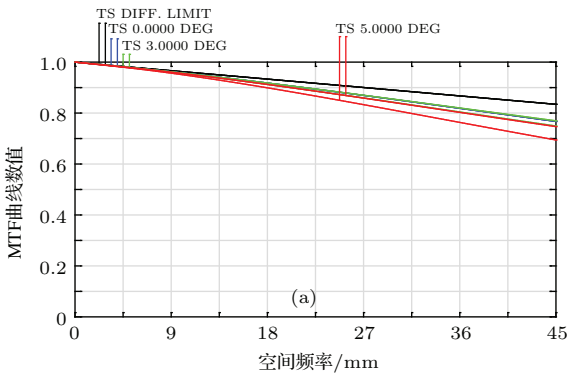


图 4 (网刊彩色) L1 优化之后成像评价图 (a) 优化之后的 L1 成像 MTF 曲线图; (b) 优化之后的 L1 成像场曲畸变图; (c) 优化之后的 L1 点列图

Fig. 4. (color online) The optimized imaging evaluation map of L1: (a) The optimized MTF curve of L1; (b) the optimized distortion figure of L1; (c) the optimized spot diagram of L1.

3.2 成像镜L3设计及整体系统优化

L1是像方远心结构设计,其倒置结构是物方远心结构,可作为L2的结构,L2与L1关于物镜一次像面呈对称分布.系统整体设计过程中,将这一结构固定,对系统L3进行优化.

初始L3的参数如表2所列,基于渥拉斯顿棱镜的单光路实时偏振成像系统结构如图5所示,系统可将各视场两种偏振成像效果完全区分开.

为研究光学系统的成像情况,分析系统综合像差,分别用MTF曲线、点列图和偏振状态图表征各个视场成像质量.通过MTF曲线对整个波段进行评价,两种偏振状态的MTF曲线如图6所示,所有视场的传递函数趋势一致且均接近衍射极限,在截止频率45 lp/mm处MTF曲线最低值可达0.55.

由图7可以看出,两种偏振状态全谱段点列图均方根半径(RMS)值均在5.45 μm以内,小于探测器像元尺寸5.5 μm.且由图8系统偏振瞳图分析可

知,当场景光以45°角偏振方向入射时,成像系统可获得0°和90°方向的完全线偏振光,不存在椭圆偏振或圆偏振状态,可将两种偏振状态完全区分,达到理想效果.

表2 初始L3的结构参数  
Table 2. The initial parameters of L3.

| 面 | 半径/mm | 厚度/mm | 玻璃     | 半高/mm |
|---|-------|-------|--------|-------|
| 1 | 121.5 | 18.4  | LAKN13 | 10.0  |
| 2 | 29.2  | 11.0  | H-F1   | 10.5  |
| 3 | 909.7 | 11.0  |        | 11.0  |
| 4 | 34.3  | 22.1  | BAFN11 | 12.2  |
| 5 | 104.3 | 11.0  | K11    | 10.2  |
| 6 | 17.5  | 9.5   |        | 8.9   |
| 7 | 22.0  | 21.7  | H-BAK2 | 10.4  |
| 8 | 19.9  | 18.4  | LASF35 | 8.4   |
| 9 | 29.9  | 1.8   |        | 5.3   |
| 像 |       |       |        | 5.1   |

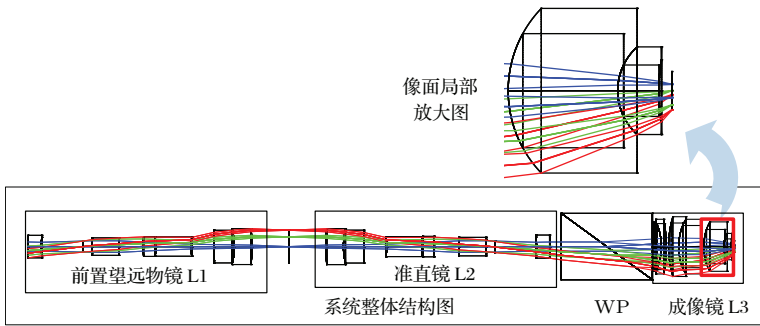


图5 (网刊彩色) 偏振成像系统结构  
Fig. 5. (color online) The structure of polarization imaging system.

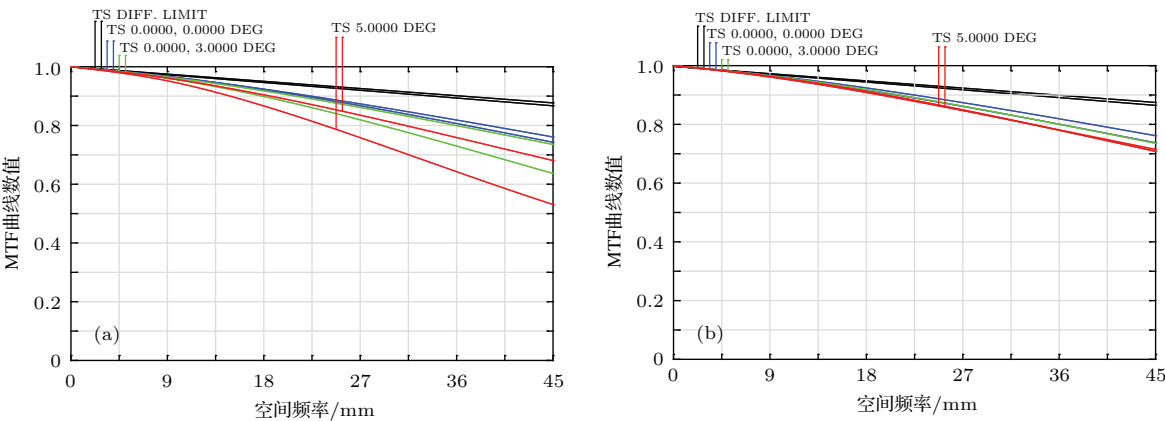


图6 (网刊彩色) 全系统MTF曲线图 (a) 偏振状态1 MTF曲线; (b) 偏振状态2 MTF曲线  
Fig. 6. (color online) The MTF curve of whole system: (a) MTF curve of polarization state 1; (b) MTF curve of polarization state 2.

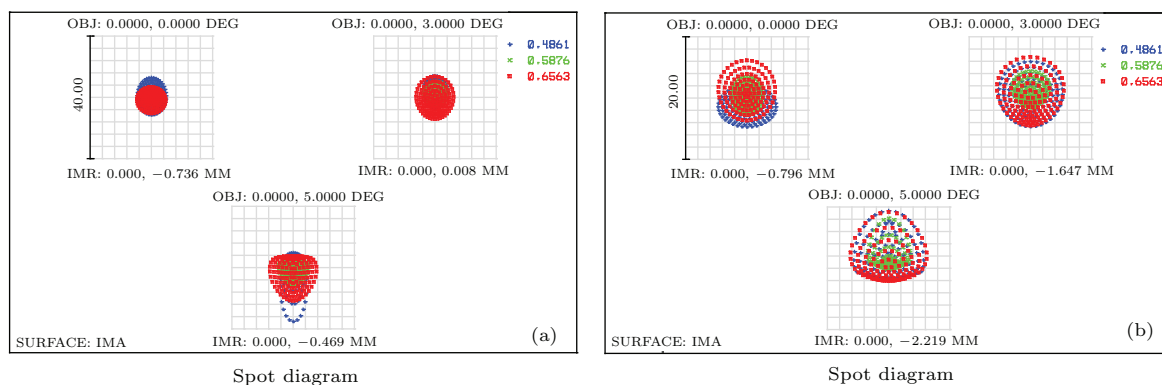


图7 (网刊彩色) 全系统点列图 (a) 偏振状态1时, 系统点列图; (b) 偏振状态2时, 系统点列图

Fig. 7. (color online) The spot diagram of whole system: (a) Spot diagram of polarization state 1; (b) spot diagram of polarization state 2.

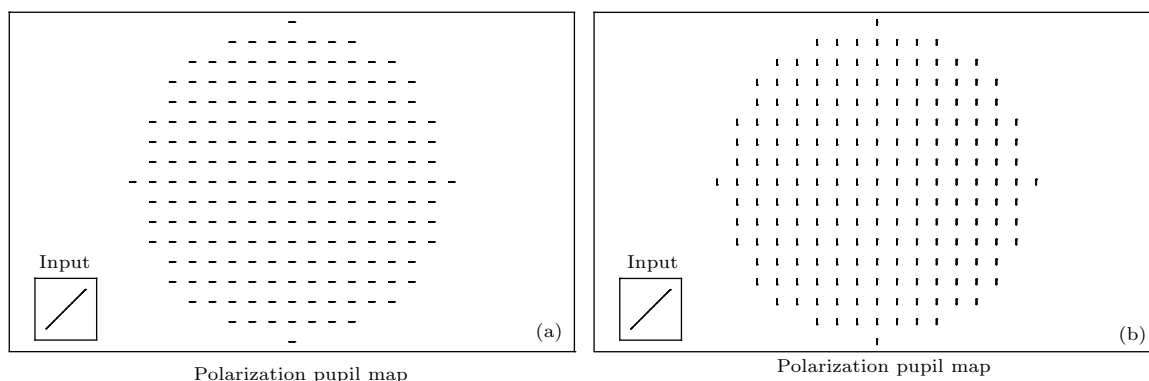


图8 全系统偏振瞳图 (a) 偏振状态1时, 系统偏振瞳图; (b) 偏振状态2时, 系统偏振瞳图

Fig. 8. The polarization map of whole system: (a) Polarization map of polarization state 1; (b) polarization map of polarization state 2.

### 3.3 系统成像及像差分析

利用ZEMAX软件进行成像仿真以及系统像差曲线分析, 并对比Seidel像差表从数据上分析系统成像效果.

如图9所示, 两种偏振状态下的光线像差图中, 坐标原点附近的曲线斜率为0, 表明像面是近轴像面, 没有离焦; 各视场中子午和弧矢方向上的曲线贴合坐标轴, 球差校正较好. 彗差的光线像差图呈反抛物线形状, 然而, 子午和弧矢方向都不存在类似曲线, 彗差校正较好; 像散的曲线与离焦的曲线相似, 但子午曲线与弧矢曲线的斜率不同, 图9中, 子午与弧矢方向上曲线斜率为零, 像散校正较好. 由图10所示全系统横向像差图可知, 新型实时偏振成像光学系统横向色差小于艾里斑直径, 满足系统对色差的要求.

图11为系统有效视场角内的偏振成像效果图. 通过仿真分析, 比较偏振状态1仿真效果图11(a)、

偏振状态2仿真效果图11(b), 偏振状态1仿真效果图尺寸为3.85 mm × 2.57 mm, 偏振状态2仿真效果图尺寸为4.14 mm × 2.76 mm. 根据轴向放大率的计算公式, 得到(7)式:

$$\alpha = \frac{nl'^2}{n'l^2}. \quad (7)$$

偏振状态1与偏振状态2图像的近轴放大率分别为3.46和3.49, 故而两偏振状态的仿真效果图尺寸在纵横方向分别存在0.56 mm和0.19 mm的差异. 两偏振态效果图紧密分布在所选探测器上下两侧, 宽度方向上尺寸为4.14 mm, 高度方向上尺寸为5.33 mm, 所选探测器的尺寸为5.632 mm × 5.632 mm, 根据计算完全满足系统成像要求.

图12表示系统场曲与畸变图, 各视场基本无场曲, 两个偏振状态有效视场内光学系统的畸变量均小于1%, 系统像差控制在理想范围内.

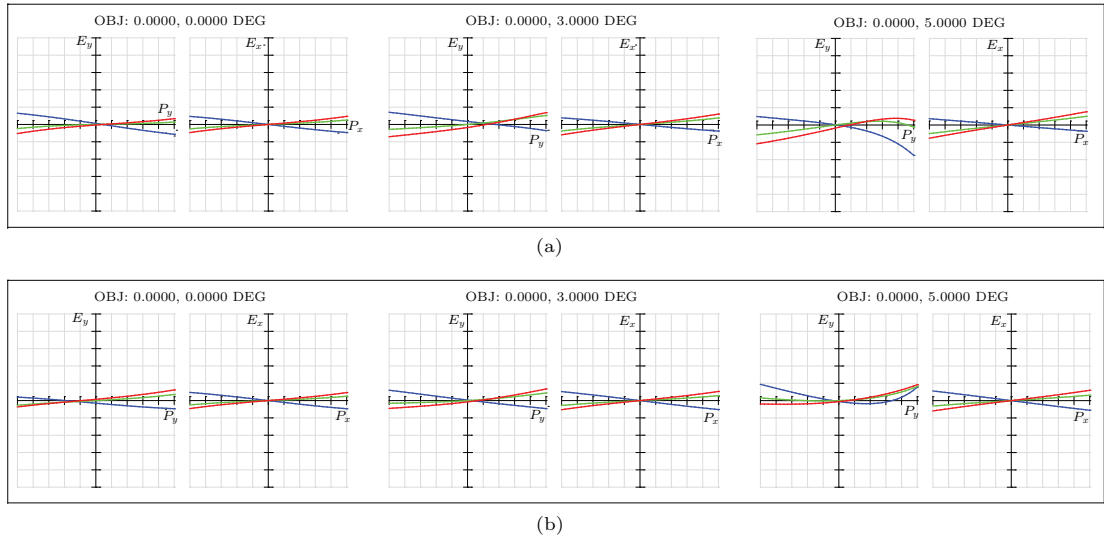


图9 (网刊彩色) 全系统光线像差图 (a) 偏振状态1, 系统光线像差图; (b) 偏振状态2, 系统光线像差图  
Fig. 9. (color online) The ray fan of whole system: (a) Ray fan of polarization state 1; (b) ray fan of polarization state 2.

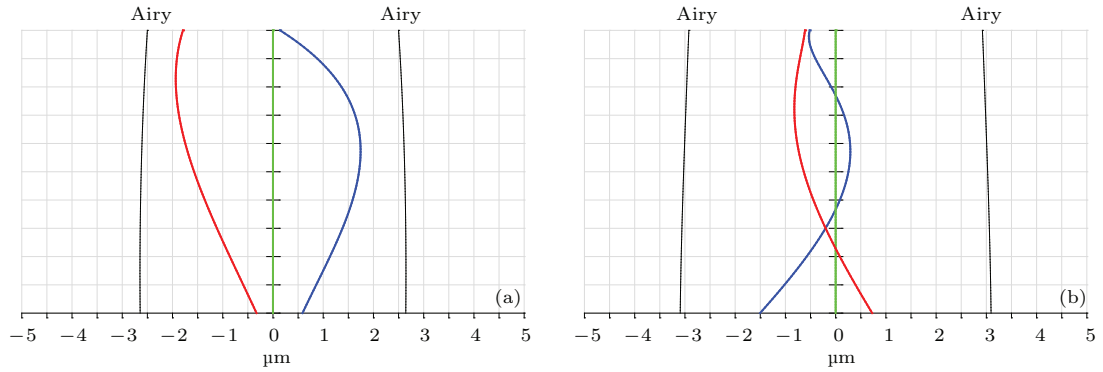


图10 (网刊彩色) 全系统横向色差图 (a) 偏振状态1, 横向色差图; (b) 偏振状态2, 横向色差图  
Fig. 10. (color online) The lateral color whole system: (a) Lateral color of polarization state 1; (b) lateral color of polarization state 2.

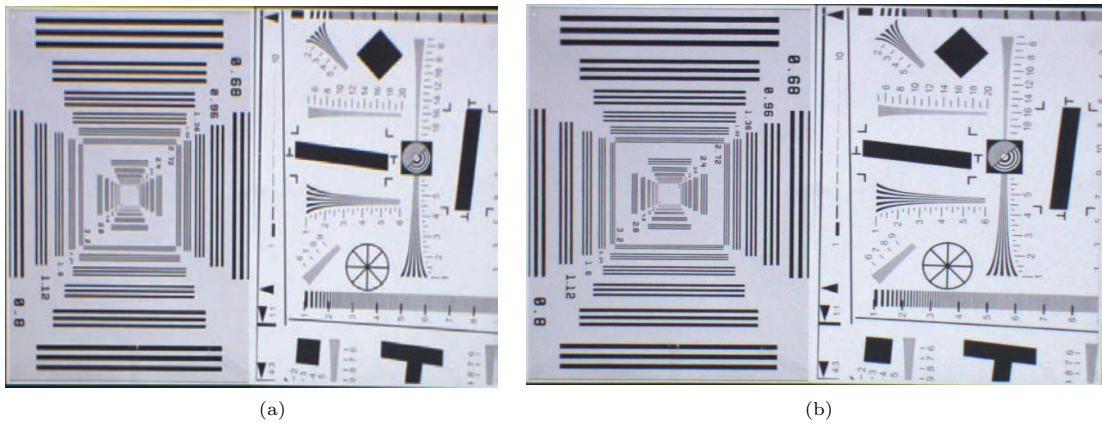


图11 全系统偏振成像效果图 (a) 偏振状态1 成像效果图; (b) 偏振状态2 成像效果图  
Fig. 11. The polarization imaging of whole system: (a) Polarization imaging of state 1; (b) polarization imaging of state 2.

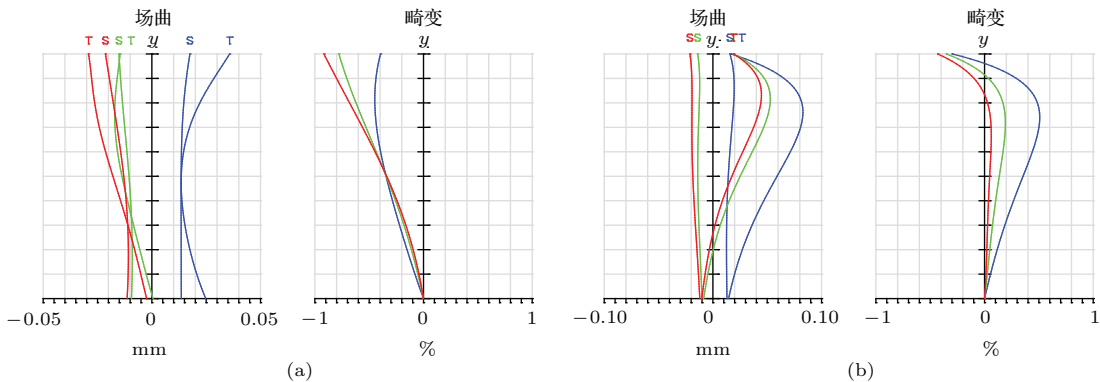


图 12 (网刊彩色) 全系统场曲与畸变曲线 (a) 偏振状态 1 场曲与畸变图; (b) 偏振状态 2 场曲与畸变图  
Fig. 12. (color online) The field-curve and distortion of whole system: (a) Field-curve and distortion of polarization state 1; (b) field-curve and distortion of polarization state 2.

考虑到 Zernike 多项式与光学像差多项式的对应关系, 使用 Zernike 多项式表示像差. Zernike 多项式方程:

$$Z(x,y)=\frac{cr^2}{1+\sqrt{1-(1+k)c^2r^2}}+\sum_{i=1}^NA_iE_i(x,y),\tag{8}$$

$Z(x,y)$  是光学表面矢高;  $k$  为圆锥系数;  $c$  为曲率半径;  $r$  为光轴方向的半径高度;  $A_i$  是 Zernike 多项式系数, Zernike 多项式系数具体展开如下:

$$\sum_{i=1}^NA_iE_i(x,y)=A_1x^1y^0+A_2x^0y^1+A_3x^2y^0$$

表 3 偏振状态 1 的 Zernike 系数表

Table 3. The Zernike coefficient table of polarization state 1.

| 级数 | Zernike 多项式                       | Zernike 标准系数 |
|----|-----------------------------------|--------------|
| 1  | $2P\cos\theta$                    | 0            |
| 1  | $2P\sin\theta$                    | 0.013        |
| 2  | $\sqrt{3}(2P^2-1)$                | 0.013        |
| 2  | $\sqrt{6}(P^2\sin2\theta)$        | 0            |
| 2  | $\sqrt{6}(P^2\cos2\theta)$        | 0.013        |
| 3  | $\sqrt{8}(3P^3-2P)\sin\theta$     | 0.008        |
| 3  | $\sqrt{8}(3P^3-2P)\cos\theta$     | 0            |
| 3  | $\sqrt{8}P^3\sin3\theta$          | -0.001       |
| 3  | $\sqrt{8}P^3\cos3\theta$          | 0            |
| 4  | $\sqrt{5}(6P^4-6P^2+1)$           | 0.01         |
| 4  | $\sqrt{10}(4P^4-3P^2)\sin2\theta$ | 0            |
| 4  | $\sqrt{10}(4P^4-3P^2)\cos2\theta$ | 0            |
| 4  | $\sqrt{10}P^4\sin4\theta$         | 0            |
| 4  | $\sqrt{10}P^4\cos4\theta$         | 0            |

$$+A_4x^1y^1+A_5x^0y^2+\cdots+A_Nx^{j-k}y^k,\tag{9}$$

基于 ZEMAX 仿真分析可获取两个偏振状态的 Zernike 系数表格, 具体参数见表 3 与表 4. Zernike 多项式与 Seidel 像差项有确定的对应关系, 可根据数值的大小, 有选择地单独处理各像差并判断系统优化进度<sup>[20]</sup>. 根据表 5 中 Zernike 系数与 Seidel 像差的对应关系比较分析, 新型实时偏振成像光学系统中球差、彗差、像散、畸变与色差的绝对值小于 0.02, 像差校正完全. 综上, 全系统子午与弧矢方向的光线像差曲线集中且与坐标轴贴合, 各像差数值小于 0.02, 整个系统成像满足设计要求.

表 4 偏振状态 2 的 Zernike 系数表

Table 4. The Zernike coefficient table of polarization state 2.

| 级数 | Zernike 多项式                       | Zernike 标准系数 |
|----|-----------------------------------|--------------|
| 1  | $2P\cos\theta$                    | 0            |
| 1  | $2P\sin\theta$                    | -0.017       |
| 2  | $\sqrt{3}(2P^2-1)$                | 0.015        |
| 2  | $\sqrt{6}(P^2\sin2\theta)$        | 0            |
| 2  | $\sqrt{6}(P^2\cos2\theta)$        | 0.009        |
| 3  | $\sqrt{8}(3P^3-2P)\sin\theta$     | -0.006       |
| 3  | $\sqrt{8}(3P^3-2P)\cos\theta$     | 0            |
| 3  | $\sqrt{8}P^3\sin3\theta$          | 0            |
| 3  | $\sqrt{8}P^3\cos3\theta$          | 0            |
| 4  | $\sqrt{5}(6P^4-6P^2+1)$           | 0.01         |
| 4  | $\sqrt{10}(4P^4-3P^2)\sin2\theta$ | 0            |
| 4  | $\sqrt{10}(4P^4-3P^2)\cos2\theta$ | 0            |
| 4  | $\sqrt{10}P^4\sin4\theta$         | 0            |
| 4  | $\sqrt{10}P^4\cos4\theta$         | 0            |

表5 Zernike 多项式与 Seidel 像差对应表

Table 5. The corresponding relation of Zernike polynomials and Seidel aberrations.

| 级数 | Zernike 多项式                           | Seidel 像差        |
|----|---------------------------------------|------------------|
| 1  | $2P \cos \theta$                      | $x$ 轴倾斜          |
| 1  | $2P \sin \theta$                      | $y$ 轴倾斜          |
| 2  | $\sqrt{3}(2P^2 - 1)$                  | 离焦               |
| 2  | $\sqrt{6}(P^2 \sin 2\theta)$          | 初级 $45^\circ$ 像散 |
| 2  | $\sqrt{6}(P^2 \cos 2\theta)$          | 初级 $0^\circ$ 像散  |
| 3  | $\sqrt{8}(3P^3 - 2P) \sin \theta$     | $y$ 轴初级彗差        |
| 3  | $\sqrt{8}(3P^3 - 2P) \cos \theta$     | $x$ 轴初级彗差        |
| 3  | $\sqrt{8}P^3 \sin 3\theta$            |                  |
| 3  | $\sqrt{8}P^3 \cos 3\theta$            |                  |
| 4  | $\sqrt{5}(6P^4 - 6P^2 + 1)$           | 初级球差             |
| 4  | $\sqrt{10}(4P^4 - 3P^2) \sin 2\theta$ | 二级 $0^\circ$ 像散  |
| 4  | $\sqrt{10}(4P^4 - 3P^2) \cos 2\theta$ | 二级 $45^\circ$ 像散 |
| 4  | $\sqrt{10}P^4 \sin 4\theta$           |                  |
| 4  | $\sqrt{10}P^4 \cos 4\theta$           |                  |

## 4 结 论

为适应动态场景中目标实时、准确的偏振成像探测需求,针对传统偏振成像实时性差、分辨率低的不足,利用渥拉斯顿棱镜分光特性,提出一种可见光波段的新型实时偏振成像系统.该联动设计可在单探测器上实时获取同一场景的两幅偏振方向相互垂直的偏振图像,弥补传统偏振成像系统分辨率低、实时性差、能量利用率低等缺陷,可减小非联动设计中畸变大的问题.整个光学系统采用透射式对称结构,方便后期机械设计与装调.在截止频率处,系统MTF曲线值可达到0.55, RMS 半径小于探测器像元尺寸.结果证明,新型实时偏振成像光学系统结构紧凑、复杂度低、成像效果优良,可同时获取相互垂直偏振的两幅图像,为实时偏振成像与探测的发展奠定技术基础.

感谢西安电子科技大学物理与光电工程学院张璐老师对本文语言的有益讨论与修改.

## 参考文献

- [1] Cao X, Roy G, Roy N, Bernier R 2009 *Appl. Opt.* **48** 4130
- [2] He H H, Zeng N, Liao R, Ma H 2015 *Prog. Biochem. Biophys.* **42** 419 (in Chinese) [何宏辉, 曾楠, 廖然, 马辉 2015 生物化学与生物物理进展 **42** 419]
- [3] Makita S, Yasuno Y, Endo T, Itoh M, Yatagai T 2006 *Appl. Opt.* **45** 1142
- [4] Zeng N, Jiang X, Gao Q, He Y H, Ma H 2009 *Appl. Opt.* **48** 6734
- [5] Langlois M, Dohlen K, Augereau J C, Mouillet D, Boccaletti A, Schmid H M 2010 *Proc. SPIE* **7735** 857049
- [6] Han J F, Yang K C, Xia M, Sun L Y, Cheng Z, Liu H, Ye J W 2015 *Appl. Opt.* **54** 3294
- [7] Liu F, Shao X P, Xiang L B, Gao Y, Han P L, Wang L 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 114203
- [8] Liu F, Cao L, Shao X P, Han P L, Xiang L B 2015 *Appl. Opt.* **54** 008116
- [9] Mu T K, Zhang C M, Li Q W, Wei Y T, Chen Q Y, Jia C L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 110704 (in Chinese) [穆廷魁, 张淳民, 李祺伟, 魏宇童, 陈清颖, 贾辰凌 2014 物理学报 **63** 110704]
- [10] Matchko R M, Gerhart G R 2008 *Opt. Eng.* **47** 016001
- [11] Li C L, Sun X B, Wang H, Wei W, Shu C M 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 0412004 (in Chinese) [李翠丽, 孙晓兵, 王涵, 韦玮, 舒存铭 2014 光学学报 **34** 0412004]
- [12] Yuan Y L, Zheng X B, Wu H Y, Meng F G, Kang Q, Chen L G, Li J J, Zou P 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 1223001 (in Chinese) [袁银麟, 郑小兵, 吴浩宇, 孟凡刚, 康晴, 陈立刚, 李健军, 邹鹏 2014 光学学报 **34** 1223001]
- [13] He H C, Ji Y Q, Zhou J K 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 0622005 (in Chinese) [贺虎成, 季轶群, 周建康 2013 光学学报 **33** 0622005]
- [14] Lindlein N, Quabis S, Peschel U, Leuchs G 2007 *Opt. Express* **15** 5827
- [15] Zhao J S 2013 *Infrared Technology* **35** 0743 (in Chinese) [赵劲松 2013 红外技术 **35** 0743]
- [16] Weijers A L, Brug H V, Frankena H J 1998 *Appl. Opt.* **37** 5150
- [17] Bènière A, Alouini M, Goudail F, Dolfi D 2009 *Appl. Opt.* **48** 5764
- [18] Zhu H C, Nan Y J, Yun M J 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 0623002 (in Chinese) [朱化凤, 南玉杰, 云茂金 2012 光学学报 **32** 0623002]
- [19] Sun J X, Pan G Q, Liu Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 094203 (in Chinese) [孙金霞, 潘国庆, 刘英 2013 物理学报 **62** 094203]
- [20] Wu Z Y, Zhang Q C 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 0412011 (in Chinese) [吴启云, 张启灿 2011 光学学报 **31** 0412011]

# A design of real-time unipath polarization imaging system based on Wollaston prism<sup>\*</sup>

Xu Jie<sup>1)</sup> Liu Fei<sup>1)</sup> Liu Jie-Tao<sup>1)</sup> Wang Jiao-Yang<sup>1)</sup> Han Ping-Li<sup>1)</sup> Zhou Cong-Hao<sup>2)</sup>  
Shao Xiao-Peng<sup>1)†</sup>

1) (School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

2) (School of Science and Technology, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

( Received 30 January 2016; revised manuscript received 27 April 2016 )

## Abstract

A real-time polarization imaging system employing the Wollaston prism and a single charge-coupled device (CCD) chip covering a wavelength range of 400–650 nm is proposed to avoid the false polarization information from dynamic scenes in non-real-time polarization detection imaging method. An architecture consisting of telescope lens, collimation lens, Wollaston prism, the imaging lens and a single CCD chip is employed in the system. The telescope lens is used to focus the incoming light on an intermediate image. And after collimation, the beam is angularly separated by the Wollaston prism. Two beams corresponding to ordinary light and extraordinary light are subsequently focused on the CCD plane via the imaging lens. The telescope lens is designed to have a telecentric structure in the imaging space, and the invert of which is used as the collimation lens, the completely symmetrical structure design is used to reduce the influence of aberrations. More abundant details from this system can be obtained by using matched image post-processing strategy, which is beneficial to high-quality target detection with enhanced working distance and improved environment adaptability. After joint-designing and optimization, the system modulation transfer function value at cut-off frequency is higher than 0.55, and the root-mean-square radius of the system is less than 5.3  $\mu\text{m}$ , which is smaller than the pixel size of the CCD detector. Additionally, the lateral chromatic aberration of the system is much smaller than the diameter of airy disk, and the absolute values of all kinds of aberrations are kept smaller than 0.02 at the same time. The calculation results show that all the aberrations are mostly corrected. The system imaging is numerically modeled and analyzed, and it is demonstrated that two intensity images with perpendicular polarization states appear adjacently on the CCD plane simultaneously in the imaging simulation. One image is formed with the fraction of the backscattered light polarized parallelly to the incident light, and the other with light polarized orthogonally to the incidence, indicating that the expected design is accomplished. Compared with the traditional amplitude-split polarization imaging system, the proposed real-time polarization imaging system shows that the improved performance for real-time detection with promoted power efficiency, spatial resolution, and the light crosstalk in focal plane is well handled. Moreover, the joint design of the whole system can compensate for the distortion aberration in the vertical direction of the CCD detector, which means that a further improvement of image quality can be expected. The proposed system has a promising perspective in the fields of underwater imaging detection, astronomical observation, remote sensing, biological tissues inspection, and environmental monitoring.

**Keywords:** polarization imaging, Wollaston prism, telescopic lens in image space, single CCD chip

**PACS:** 42.15.Eq, 42.25.Ja, 42.15.Fr, 42.25.Lc

**DOI:** 10.7498/aps.65.134201

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61575154) and the National Defense Foundation of China (Grant No. 90406150009).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [xpshao@xidian.edu.cn](mailto:xpshao@xidian.edu.cn)