

## 离轴三反同时偏振成像仪光机设计

凌明椿<sup>1,2,3</sup>, 宋茂新<sup>1,2\*</sup>, 洪津<sup>1,2</sup>, 孙晓兵<sup>1,2</sup>, 陶菲<sup>1,2,3</sup>

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;
3. 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 基于离轴三反的前置望远系统, 结合分振幅同时偏振成像技术, 设计了一种运用于卫星平台环境的高空间分辨率的同时偏振成像仪, 能同时获取目标的斯托克斯偏振参数, 为抑制海面耀光、海雾、大气辐射等干扰, 提升探测目标对比度提供了一种有效手段, 在进行动态目标探测方面具有明显优势。并以光学设计为输入进行详细结构设计。最后通过实验室整机性能测试, 仪器的工作谱段 500~700 nm, 视场角  $8.5^\circ \times 0.1^\circ$ , 空间分辨率为 5 m@500 km, 光学 MTF > 0.4@71.4 lp/mm, 在高度角  $30^\circ$ 、反射率 0.2 的条件下, 信噪比优于 38 dB, 偏振测量精度优于 1% ( $P \leq 0.3$ ), 整机一阶模态 195 Hz, 结构能够承受发射时严苛的力学环境, 具备良好的强度和刚度。整机性能满足实际使用需求。

**关键词:** 离轴三反; 偏振; 光机设计; 同时

**中图分类号:** V447+.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0518001

## Optical design for simultaneous polarization imager based on off-axis three-mirror

Ling Mingchun<sup>1,2,3</sup>, Song Maoxin<sup>1,2\*</sup>, Hong Jin<sup>1,2</sup>, Sun Xiaobing<sup>1,2</sup>, Tao Fei<sup>1,2,3</sup>

- (1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
3. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization of Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** A kind of simultaneous imaging polarimeter with a high spatial resolution for satellite platform environments was designed which was based on an off-axis three-mirror system as front-view telescope system and combined with simultaneous-amplitude polarization imaging technology, and the simultaneous polarization imager was designed to simultaneously acquire the target Stokes parameters to suppress sea surface glare, sea fog, atmospheric radiation and other disturbances. It provided an effective means to improve the contrast of detection targets, and had obvious advantages in dynamic target detection. According to the optical system, the detailed structural design had been finished. Finally, through the laboratory performance test, the working spectrum was 500–700 nm, the FOV was  $8.5^\circ \times 0.1^\circ$ , the spatial

收稿日期: 2018-12-13; 修订日期: 2019-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(41405037); 中国科学院天文联合基金(U1331111)

作者简介: 凌明椿(1992-), 男, 博士生, 主要从事空间遥感仪器光机设计与分析方面的研究。Email: lingmingchun@126.com

导师简介: 洪津(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光谱偏振遥感技术和航空航天遥感工程技术等方面的研究。

Email: hongjin@aiofm.ac.cn

resolution was 5 m@500 km, the optical MTF was more than 0.4@71.4 lp/mm, and under the condition of an elevation angle of 30° and a reflectivity of 0.2, the noise ratio was better than 38 dB, the polarization measurement accuracy is better than 1% ( $P \leq 0.3$ ), the first-order mode of the whole machine was 195 Hz, and it had good strength and stiffness. The overall performance meets the actual use requirements.

**Key words:** off-axis three-mirror; polarization; optical design; simultaneous

## 0 引言

海洋目标光学遥感成像观察时经常受到海面耀斑、海雾、大气辐射等因素的干扰,从而难以对目标进行识别。而偏振探测技术,它可以获取目标辐射的偏振强度值、偏振度、偏振角、偏振椭率和辐射率等参数,大大增加被探测目标的信息量<sup>[1]</sup>,所以充分发挥偏振信息的优势,提升探测目标对比度具有重要意义。

同时偏振测量方式属于偏振测量方式的一种,因其不存在活动部件或调制器件,在测量快速变化目标方面存在明显优势。这种测量方式最先由 Garlick 等<sup>[2]</sup>提出,利用统一的前置光学系统,通过偏振分束器和延迟器,使用 4 个独立的光路和探测器同时成像同一目标的不同偏振方向的偏振图像,避免了因目标移动造成的虚假信息探测<sup>[3]</sup>。

反射式光学系统由于具有良好的热特性、无色差、易实现长焦距、可获得大口径材料等优点被广泛应用于空间遥感领域<sup>[4]</sup>。其中离轴三反系统是典型的代表。离轴三反系统是在同轴三反的基础上通过视场离轴,或者光阑离轴,或者结合两种方式实现的中心无遮拦的反射式系统<sup>[5]</sup>。此外可通过优化离轴三反系统的各个变量,增加了消除各种像差的可能性,所以是优良成像质量的前置望远系统的首选。

文中结合离轴三反系统和分振幅偏振测量方式的优势,设计了一种基于离轴三反的同时偏振成像仪。通过实验室性能测试,测试结果表明:整机性能符合技术要求,满足实际使用需求。

## 1 光学系统设计

### 1.1 工作原理

同时偏振成像仪的工作原理<sup>[6-7]</sup>如图 1 所示。前

置离轴三反的望远系统,带通滤光片限制工作波段,偏振分束棱镜组件将目标的偏振信息分解到四个探测器上进行解析。第一块分束棱镜为部分偏振分束棱镜(PBSC),理论上透过 80%的 P 偏振光和 20%的 S 偏振光,反射 20%的 P 偏振光和 80%的 S 偏振光。部分偏振分束棱镜的透射光,经方位角 22.5°的 1/2 波片及线偏振分束棱镜(PBSC)后,P 偏振分量透射至 CCD1,S 分量反射至 CCD2。部分偏振分束棱镜的反射光,经方位角为 45°的 1/4 波片及线偏振分束棱镜后,P 偏振分量透射至 CCD3,S 分量反射至 CCD4。整机随卫星平台运动,可以实现推扫成像。

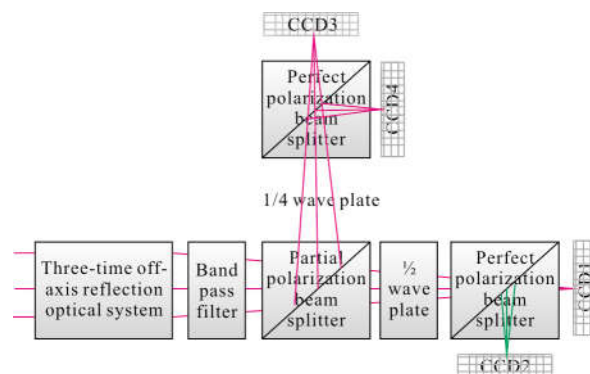


图 1 同时偏振成像仪偏振测量原理图

Fig.1 Schematic of the simultaneous imaging polarimeter's polarized measuring system

由于系统的视场不大,忽略其透镜的偏振效应,只分析偏振器件的偏振效应。根据斯托克斯矢量的测量理论,将各偏振器件的偏振效应用 Mueller 矩阵表示,各光路的 Mueller 测量矩阵如下:

$$M_{CCD1} = PBt \cdot R(-22.5^\circ, \frac{\lambda}{2}) \cdot PPt =$$

$$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.5 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$M_{CCD2} = PB_r \cdot R(-22.5^\circ, \frac{\lambda}{2}) \cdot PP_t =$$

$$\begin{bmatrix} 0.5 & -0.5 & 0 & 0 \\ -0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.5 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M_{CCD3} = PB_t \cdot R(45^\circ, \frac{\lambda}{4}) \cdot PP_r =$$

$$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.5 & -0.3 & 0 & 0 \\ -0.3 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$M_{CCD4} = PB_r \cdot R(45^\circ, \frac{\lambda}{4}) \cdot PP_r =$$

$$\begin{bmatrix} 0.5 & -0.5 & 0 & 0 \\ -0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.5 & -0.3 & 0 & 0 \\ -0.3 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： $M$  表示各通道的 Mueller 测量矩阵，下标表示不同通道； $PB_t, PB_r$  分别表示部分偏振分束器的透射与反射 Mueller 矩阵，这里的能量分束比选为 80%:20%； $PP_t, PP_r$  分别表示偏振分束器的透射与反射 Mueller 矩阵； $R(-22.5^\circ, \lambda/2)$  表示方位角为  $-22.5^\circ$  的二分之一波片； $R(-45^\circ, \lambda/4)$  表示方位角为  $-45^\circ$  的四分之一波片。

由于探测器只对第一分量响应，因此提取各通道 Mueller 矩阵的第一行，并写成矩阵如下：

$$A = \begin{bmatrix} M_{CCD1}(1) \\ M_{CCD2}(1) \\ M_{CCD3}(1) \\ M_{CCD4}(1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.15 & -0.20 & 0.00 \\ -0.25 & 0.15 & 0.20 & 0.00 \\ 0.25 & -0.15 & 0.00 & -0.20 \\ 0.25 & -0.15 & 0.00 & 0.20 \end{bmatrix} \quad (5)$$

假设目标信号的斯托克斯矢量为  $S = [I \ Q \ U \ V]^T$ ，则四路 CCD 测量的信号强度  $I$ ，即系统的测量方程表示如下：

$$I = \begin{bmatrix} i \\ i \\ i \\ i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} CCD1 \\ CCD2 \\ CCD3 \\ CCD4 \end{bmatrix} = A \cdot S = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.15 & -0.20 & 0.00 \\ 0.25 & 0.15 & 0.20 & 0.00 \\ 0.25 & -0.15 & 0.00 & -0.20 \\ 0.25 & -0.15 & 0.00 & 0.20 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据系统的测量方程和从四路 CCD 探测器的

测量信号，可以推出目标信号的斯托克斯矢量为：

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = A^{-1} \cdot I = \begin{bmatrix} 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 1.67 & 1.67 & -1.67 & -1.67 \\ -2.50 & 2.50 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & -2.50 & 2.50 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ i \\ i \\ i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} CCD1 \\ CCD2 \\ CCD3 \\ CCD4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

### 1.2 光学系统参数计算

光学系统焦距、视场、像元大小、成像幅宽及地面分辨率的关系为：

$$N = \frac{2f \cdot \tan \omega}{d} = \frac{2fH \cdot \tan \omega}{GSD} \quad (8)$$

式中： $N$  为像元数目； $\omega$  为半视场角，这里为  $4.25^\circ$ ； $d$  为单个像元尺寸； $f$  为光学系统焦距； $H$  为卫星轨道高度，取 500 km； $GSD$  为地面星下点分辨率，取 5 m。

考虑到相机尺寸和重量的限制，选用 TDICCD 作为焦平面探测器，探测器像元尺寸为  $7 \mu\text{m}$ ，代入公式(8)可求得光学系统焦距为 700 mm，像元数目约为 14 863，幅宽为 74.3 km。从信噪比考虑，相对孔径为 1/6，系统孔径取为 115 mm，线视场的宽度为：

$$\omega = \arctan\left(\frac{d \cdot 96}{f}\right) = \arctan\left(\frac{7.96 \cdot 10^{-3}}{700}\right) = 0.055^\circ \quad (9)$$

对于成像质量，探测器的耐奎斯特采样频率为 71.4 cycles/mm，对于这一频率，拟规定平均  $MTF \geq 0.4$  作为设计目标。

### 1.3 光学系统设计与分析

根据上节分析，光学系统的最终布局图如图 2 所示。前置望远系统是由三个反射镜构成的像方远心系统。像方远心系统优点在于：如果 CCD 探测器不能准确定位于焦平面时，像点的中心位置不改变；在远心光路中加入滤光片不会因不同视场入射角的变化导致的中心波长漂移，从而影响辐射探测精度；远心光路最重要的意义在于保证偏振分束棱镜在各视场具有近似相同的入射角，从而保证准确一致的偏振分束参数，从而保证偏振探测精度。

三片反射镜为正负正结构，孔径光阑设置在第二面凸面镜(M2)上。三片反射镜原理上均可设计为非球面，但从实际系统的可加工及检测角度考虑，尽量采用圆锥二次曲面甚至球面。由于凸二次曲面的全口径检测非常困难，因此次镜(M2)采用了球面镜。主镜(M1)采用了离轴凹双曲面，三镜(M3)为离轴凹扁球面。

探测器前的三块平板玻璃代表两块偏振分束棱镜及波片延迟器。对完全的反射系统不存在色差矫正问题，但由于偏振探测引入了偏振分束棱镜及波片延迟器件，相当于在光路中插入了一定厚度的平板玻璃，而平板玻璃引入的色差与厚度成正比，由于系统的光谱带宽约为 200 nm，最终引入的色差难以忽略，因此需要使用透镜进行色差矫正，采用了成都光明玻璃厂的低色散玻璃 HFK61\_CDGM 和肖特的 K10\_Schott。

实际系统共分为 4 路，每一路光学结构和像质相同，设计中只对其中一路进行像质模拟与分析。

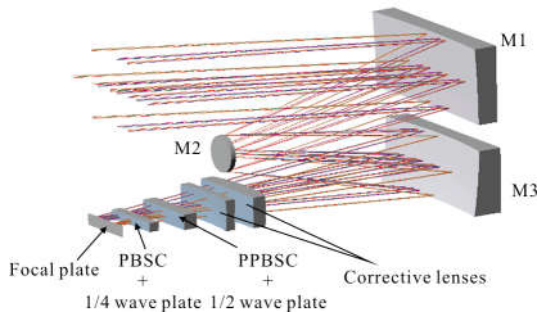


图 2 光学系统三维布局图

Fig.2 3D layout of optical system

根据系统的详细结构参数，对系统的性能进行模拟，以评估系统像质能否满足最终指标要求。系统

的点列图如图 3 所示，可以看出：系统具有衍射极限像质，各视场点的弥散斑均小于一个探测器像元，且边缘视场与中心视场的像质接近。系统的波像差如图 4 所示，最差 RMS 波像差大约为 1/45 波长。系统的 MTF 性能曲线见图 5，可以看出：系统的 MTF 值均接近衍射极限系统的理论值，在探测器的耐奎斯特采样频率 71.4 cycles/mm 处的 MTF 理论值均优于 0.6，因此综合看来，系统具有优良的光学成像质量及分辨能力。

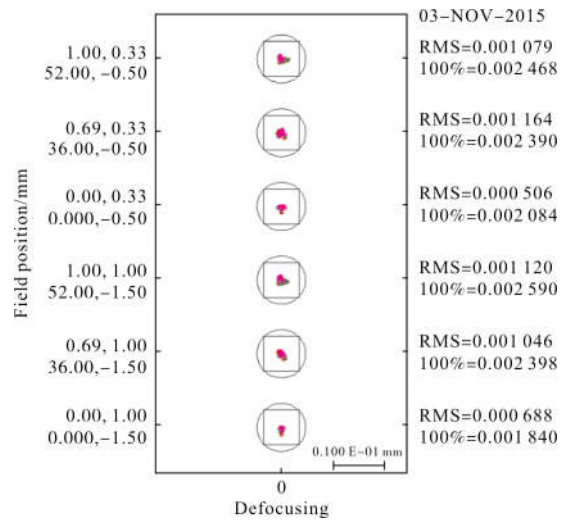


图 3 光学系统点列图

Fig.3 Spot diagram of optical system

| Field | Best individual focus             |               |            |            |           |        | Best composite focus |            |           |        |  |
|-------|-----------------------------------|---------------|------------|------------|-----------|--------|----------------------|------------|-----------|--------|--|
|       | Normalized relative field of view | Field of view | Shift/mm   | Focus/mm   | RMS/waves | Strehl | Shift/mm             | Focus/mm   | RMS/waves | Strehl |  |
| X     | 0.00                              | 0.00          | 0.000 000  | 0.000 041  | 0.006 7   | 0.998  | 0.000 000            | -0.001 086 | 0.007 0   | 0.998  |  |
| Y     | 1.00                              | -6.50         | -0.000 364 |            |           |        | -0.000 056           |            |           |        |  |
| X     | 0.69                              | 2.97          | 0.000 033  | 0.002 566  | 0.018 7   | 0.986  | 0.000 029            | -0.001 086 | 0.019 7   | 0.985  |  |
| Y     | 1.00                              | -6.51         | 0.000 084  |            |           |        | 0.000 012            |            |           |        |  |
| X     | 1.00                              | 4.29          | -0.000 036 | -0.002 240 | 0.019 0   | 0.986  | -0.000 035           | -0.001 086 | 0.0191 1  | 0.986  |  |
| Y     | 1.00                              | -6.52         | 0.000 069  |            |           |        | 0.000 092            |            |           |        |  |
| X     | 0.00                              | 0.00          | 0.000 000  | -0.002 762 | 0.008 5   | 0.997  | 0.000 000            | -0.001 086 | 0.009 0   | 0.997  |  |
| Y     | 0.66                              | -6.42         | -0.000 099 |            |           |        | -0.000 065           |            |           |        |  |
| X     | 0.69                              | 2.96          | 0.000 032  | 0.000 292  | 0.022 0   | 0.981  | 0.000 030            | -0.001 086 | 0.022 1   | 0.981  |  |
| Y     | 0.33                              | -6.43         | 0.000 030  |            |           |        | 0.000 003            |            |           |        |  |
| X     | 1.00                              | 4.29          | -0.000 031 | -0.005 107 | 0.015 6   | 0.990  | -0.000 029           | -0.001 086 | 0.016 9   | 0.989  |  |
| Y     | 0.33                              | -6.44         | -0.000 004 |            |           |        | 0.000 079            |            |           |        |  |

图 4 系统的波像差

Fig.4 Wave aberration of optical system

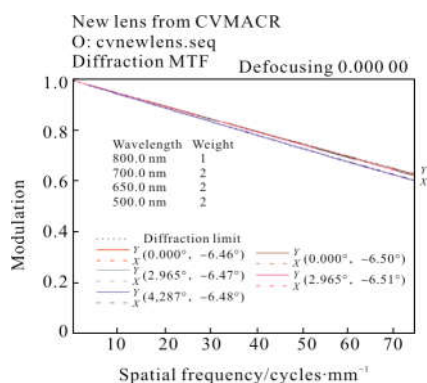


图 5 系统的 MTF 性能曲线

Fig.5 MTF of optical system

## 2 结构设计

结构设计时，需保证整机足够的强度和刚度，以适应复杂的空间热力学环境。此外由于偏振光对应力敏感，所以光学镜片安装需采取消热设计和无应力安装，从而达到最佳的成像质量和测量精度。整机结构布局如图 6 所示，整机系统由前置离轴三反系统、矫正镜组件、偏振解析组件和探测器组件组成。

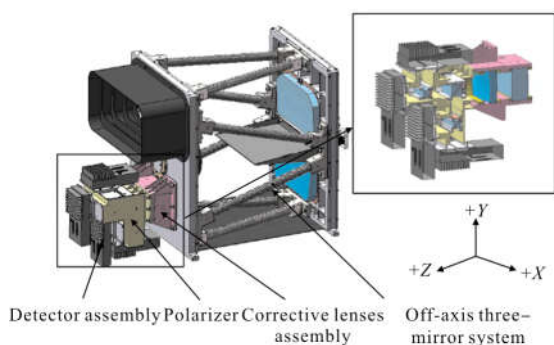


图 6 同时偏振成像仪结构图

Fig.6 Structure of the simultaneous imaging polarimeter

### 2.1 材料选取

经分析，离轴三反系统对结构的稳定性要求高。此外，系统光学件支撑结构与光学件需进行消热设计来补偿温度的变化，从而保证系统的性能稳定。综合考虑材料的热力学性能和经济合理性，反射镜、镜框、三反系统框体的材料分别为微晶玻璃、铝合金(2A12)和碳纤维。材料的属性如表 1 所示。

表 1 材料属性

Tab.1 Material properties

| Material       | Density/<br>kg · m <sup>-3</sup> | Modulus of<br>elasticity<br>/GPa | Poisson's<br>ratio | Linear<br>expansion<br>coefficient/<br>K <sup>-1</sup> |
|----------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------|--|
| Pyroceram      | 2 500×10 <sup>3</sup>            | 90.0                             | 0.25               | 0.5×10 <sup>-6</sup>                                   |
| Aluminum alloy | 2 800×10 <sup>3</sup>            | 72.4                             | 0.33               | 23.0×10 <sup>-6</sup>                                  |
| Carbon fiber   | 1 780×10 <sup>3</sup>            | >2 100                           | 0.30               | -1.4×10 <sup>-6</sup>                                  |

### 2.2 力学有限元分析

仪器运用于空间环境，会受发射时恶劣的振动环境影响，要求仪器有良好的结构刚性，一阶固有频率大于 100 Hz。强度应满足冲击工况、正弦振动与随机振动工况而不发生破坏。力学工况列出如表 2~4 所示。

表 2 冲击工况条件

Tab.2 Impact condition

| Frequency range/Hz | SRS, Q=10   |
|--------------------|-------------|
| 100-600            | 6 dB/oct    |
| 600-4 000          | 600 g       |
| Load direction     | Three axial |

表 3 正弦振动条件

Tab.3 Sine vibration condition

| Frequency range/Hz | Amplitude     |
|--------------------|---------------|
| 10-20              | 5.625 mm(0-P) |
| 20-100             | 9 g           |
| Sweep rate         | 2 oct/min     |
| Load direction     | Three axial   |

表 4 随机振动条件

Tab.4 Random vibration condition

| Frequency range/Hz | PSD                         |
|--------------------|-----------------------------|
| 10-50              | +6 dB/oct                   |
| 50-110             | 0.7 g <sup>2</sup> /Hz      |
| 110-150            | 0.7-0.08 g <sup>2</sup> /Hz |
| 150-450            | 0.08 g <sup>2</sup> /Hz     |
| 450-2 000          | -18 dB/oct                  |
| GRMS               | 9.78 GRMS                   |
| Load time          | 2 min                       |
| Load direction     | Three axial                 |

对整机的安装角施加固定约束，对整机进行模态分析，得到结果如表5所示。

表 5 模态分析结果

Tab.5 Mode analysis result

| Order number | Natural frequency/Hz |
|--------------|----------------------|
| 1            | 195                  |
| 2            | 336                  |
| 3            | 547                  |
| 4            | 608                  |
| 5            | 728                  |

整机的一阶频率 195 Hz, 振动方向为框体绕 x 轴旋转，二阶频率 336 Hz, 振动方向为探测器组件绕 x 轴旋转。满足整机一阶频率大于 100 Hz 的要求。动力学仿真结果如图 7~9 所示。

由各类工况分析的结果可知，结构最大应力发生在 x 向冲击，最大应力值为 279.4 Mpa, 发生在碳纤维杆根部。用安全裕度  $M_s$  表征结构强度的剩余系数：

$$M_s = \frac{[\sigma]}{\sigma_{\max} f} - 1 > 0 \quad (10)$$

式中： $[\sigma]$ 为许用应力，取 3 500 MPa； $\sigma_{\max}$ 为在各种

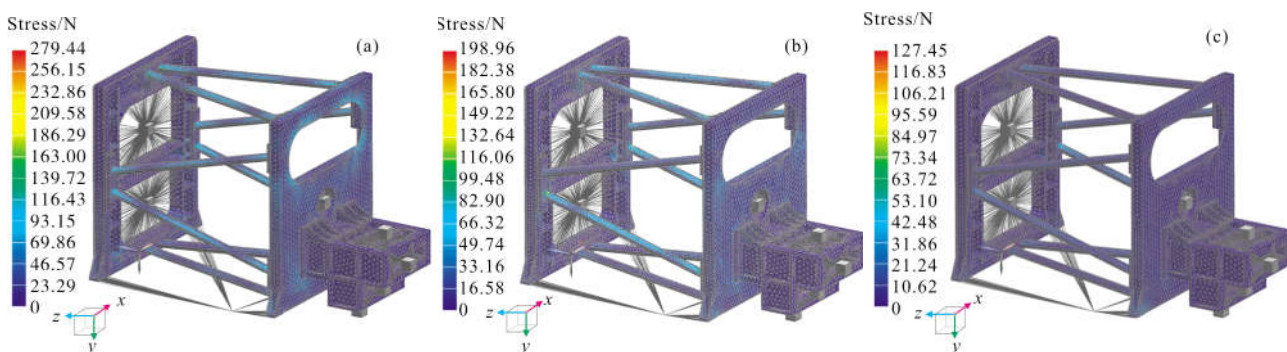


图 7 冲击工况应力分布情况

Fig.7 Stress distribution under impact condition

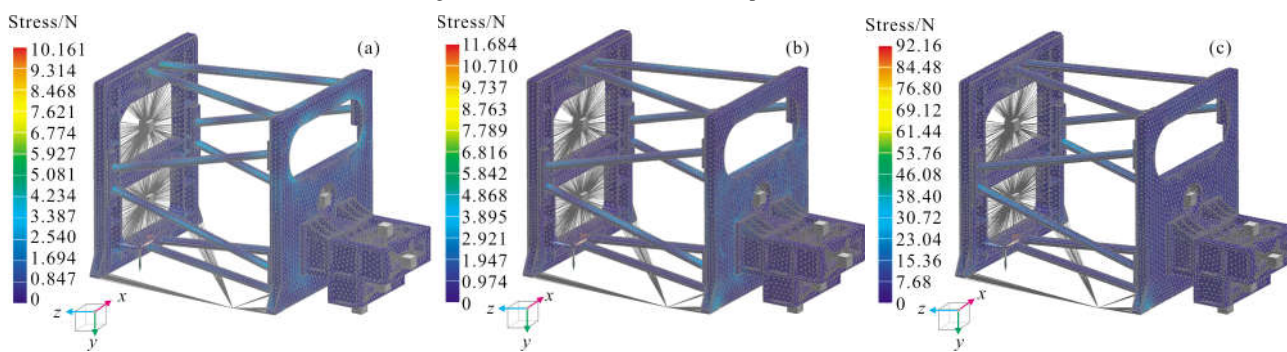


图 8 正弦工况应力分布情况

Fig.8 Stress distribution under sine vibration condition

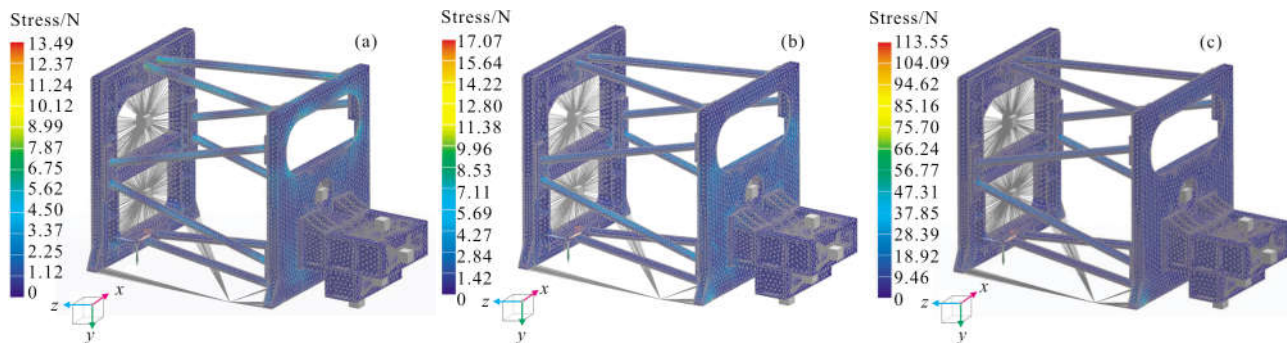


图 9 随机工况应力分布情况

Fig.9 Stress distribution under random vibration condition

载荷工况下计算的结构的最大应力值,取 279.4 MPa;  
 f 为安全系数,取 2.0。可知此时的安全裕度为:

$$Ms = \frac{3 \ 500}{279.4 \times 2.0} - 1 \approx 5.3 > 0 \quad (11)$$

由此可知整机的结构强度满足要求。

### 2.3 热环境适应性设计与分析

整机运用于空间环境,承受复杂的热环境,光学系统内镜间隔、光学件曲率半径等参数会发生变化,从而影响光学系统的成像质量。另外,对于偏振测量仪器,光学镜片的内应力直接影响偏振测量精度。除安装应力外,镜座与光学件高低温条件下差分膨胀与收缩产生的应力是主要的应力来源。

Vukobratovich 等<sup>[8]</sup>提出一种解析方法来评估由温度造成的光学件与镜筒粘接处的差分尺寸变化形成的应力:

$$S_s = \frac{(\alpha_M - \alpha_G) \Delta T S_e \tanh(\beta L)}{\beta t_e} \quad (12)$$

$$S_e = \frac{E_e}{2(1+\nu_e)} \quad (13)$$

$$\beta = \left[ \frac{S_e}{t_e} \left( \frac{1}{E_M t_M} + \frac{1}{E_G t_G} \right) \right]^{1/2} \quad (14)$$

式中: $S_s$ 为粘接处应力; $\alpha_M$ 和 $\alpha_G$ 分别为镜座和光学件的热膨胀系数; $\Delta T$ 为与装配温度的差值; $S_e$ 为胶合剂切边模量; $L$ 为粘接处的最大尺寸; $t_e$ 为粘接处厚度; $E_M$ 和 $E_G$ 分别为镜座和光学件的杨氏模量; $\nu_e$ 为焊粘接剂的泊松比; $t_M$ 和 $t_G$ 分别为镜座和光学件的厚度。

可以看出:通过选择合适的粘接和粘接厚度,可以有效减小因温度造成的光学件内部的应力。R. Vanbezoijen 等<sup>[8]</sup>推导出粘接剂厚度的公式:

$$t_e = \frac{(t_G/2)(1-\nu_e)(\alpha_M - \alpha_G)}{\alpha_e - \alpha_M - \nu_e(\alpha_G - \alpha_e)} \quad (15)$$

式中: $\alpha_e$ 为粘接剂的热膨胀系数。系统选用的粘接剂为 GD414 硅橡胶, $\alpha_e = 2.48 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

系统的前置离轴三反系统,温度变化造成镜间隔及曲率半径参数的变化。镜片基材选用低膨胀系数的微晶玻璃,采用低膨胀系数、高强度的碳纤维杆作为支撑结构。装调环境为室温( $20 \pm 2$ ) $^\circ\text{C}$ ,当环境温度变化 $\pm 20$  $^\circ\text{C}$ 时,以系统的 MTF 为评价指标,系统的 MTF 曲线如图 10~11 所示,系统 MTF >

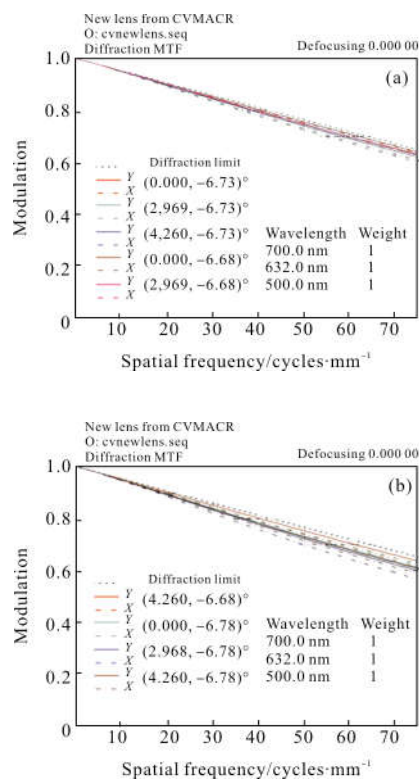


图 10 0 °C 时系统 MTF 曲线

Fig.10 MTF of optical system at 0 °C

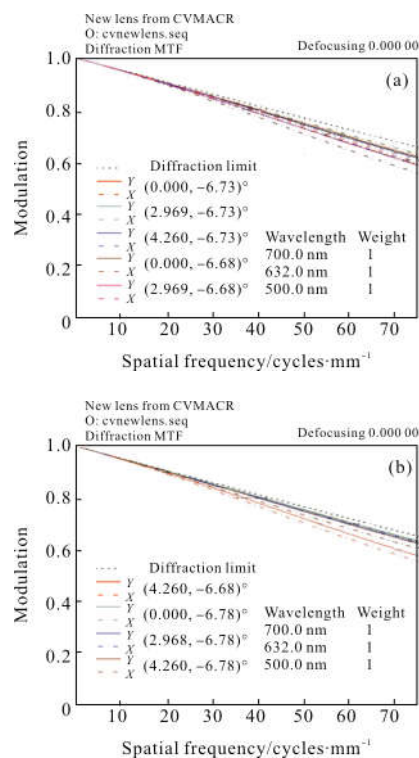


图 11 40 °C 时系统 MTF 曲线

Fig.11 MTF of optical system at 40 °C

0.4@71.4 lp/mm 满足指标要求,系统的热环境适应性良好。

为保证仪器工作是良好的热环境,需对系统进行精密热控,此项工作也将后续展开。

### 3 系统测试

#### 3.1 MTF 测试

使用干涉法测量成像仪的光学 MTF。通过干涉仪测得光学系统出射光瞳与标准波面的干涉图,利用干涉图得到出瞳面的光瞳函数,通过光瞳函数的自相关计算得到光学传递函数。测量原理图如图 12 所示,各视场的 MTF 实测值如图 13 所示,均满足  $MTF > 0.4 @ 71.4 \text{ lp/mm}$ ,成像质量优良。

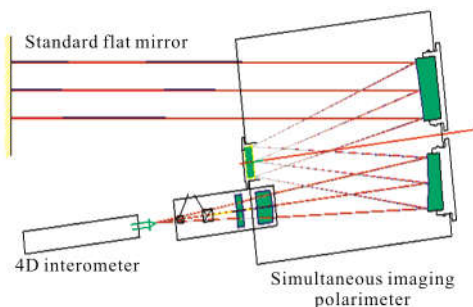


图 12 MTF 测量原理图

Fig.12 Schematic diagram of MTF test

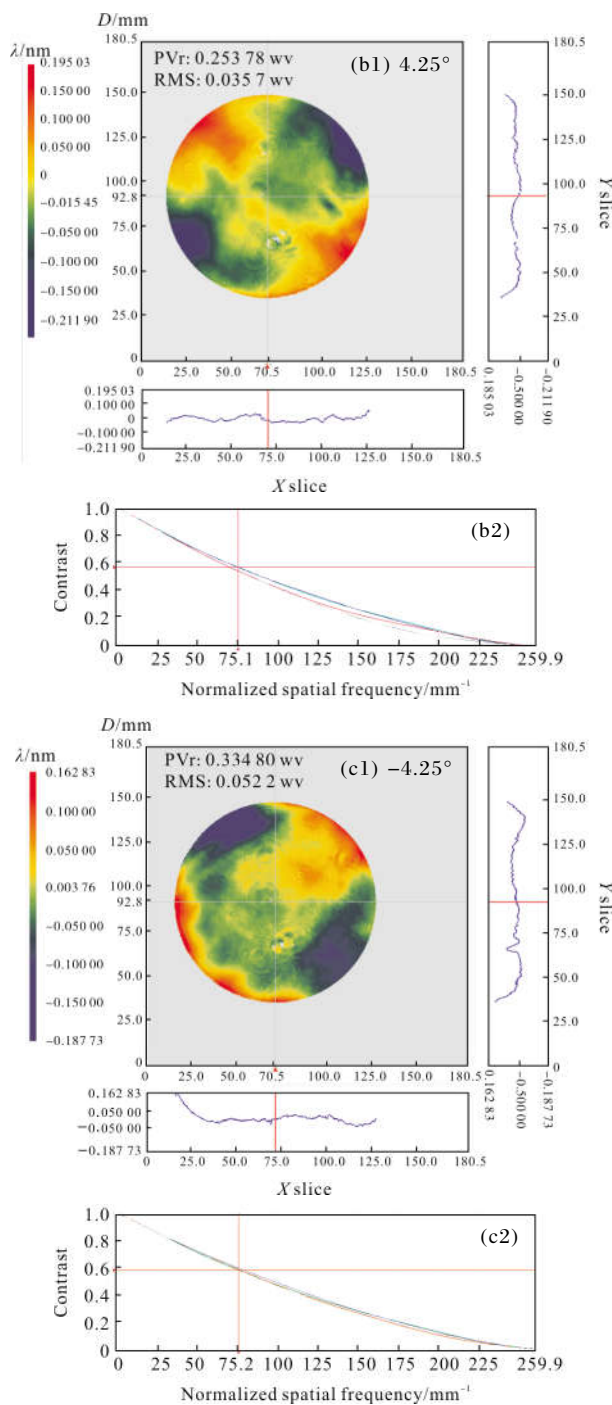
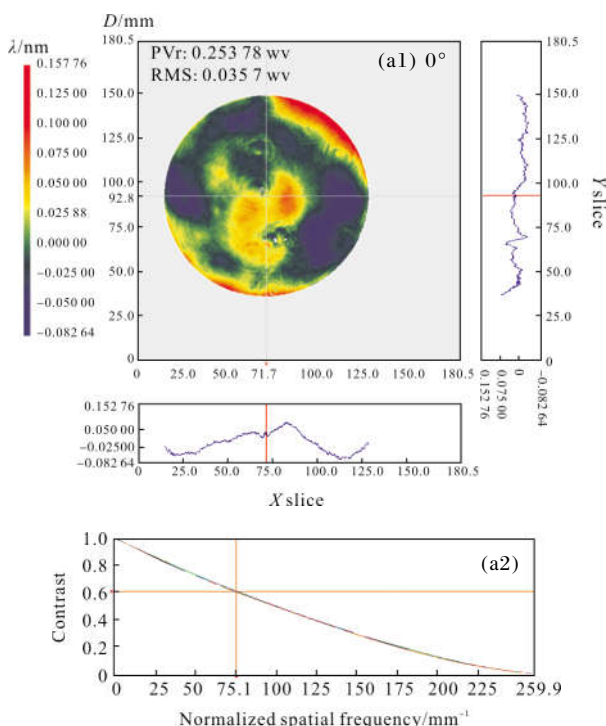


图 13 系统干涉图及 MTF 测试曲线

Fig.13 Interference figure and MTF of system

#### 3.2 信噪比

在高度角  $30^\circ$ 、反射率 0.2 的辐亮度条件下,仪器进行短时间内的连续多次测量,探测器响应的均值为信号值,标准偏差为噪声值。实测辐亮度条件下信噪比为该信号值比噪声值。指标辐亮度下的信噪比表示为:



$$SNR_2 = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} SNR_1 \quad (16)$$

式中： $L_1$ 为在 500~700 nm 带宽内，太阳高度角为 30°、反射率为 0.2 时的辐亮度值； $L_2$ 为 SVC 的光谱数据相同带宽内的实测辐亮度值； $SNR_1$ 是实测辐亮度条件下信噪比。

实验室测试整机信噪比的原理图如图 14 所示，调节积分球的亮度在 500~700 nm 接近太阳高度角为 30°、反射率为 0.2 时的辐亮度值。待积分球稳定

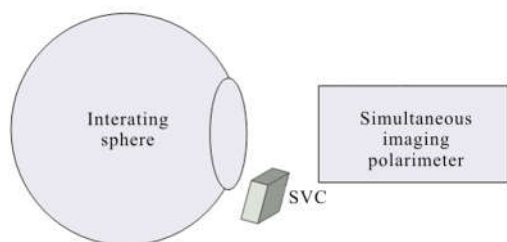


图 14 信噪比测试原理图

Fig.14 Schematic diagram of SNR test

后，仪器对准积分球连续测量 200 次，对测试数据取均值  $\overline{DN}$  和标准差  $R$ 。同时获取 SVC 同步监测光谱数据。太阳光谱辐照度曲线在仪器工作波段内积分，得到指标辐射亮度为：

$$L_1 = 5\ 729.444 (\mu W / (cm^2 \cdot \mu m^{-1} \cdot rad^{-1})) \quad (17)$$

SVC 光谱仪实测实验室定标光源光谱曲线在仪器工作波段积分，得到实测辐亮度：

$$L_2 = 4\ 874.107 (\mu W / (cm^2 \cdot \mu m^{-1} \cdot rad^{-1})) \quad (18)$$

整机的信噪比实测数据计算结果见表 6。指标辐亮度下的信噪比满足指标要求， $SNR > 38$  dB。

表 6 信噪比测试结果

Tab.6 SNR test results

|                 | CCD1     | CCD2     | CCD3     | CCD4     |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| $\overline{DN}$ | 2 936.68 | 2 708.85 | 3 382.87 | 3 126.37 |
| $R$             | 28.87    | 27.37    | 30.73    | 28.95    |
| $L_2$           | 101.732  | 98.963   | 110.074  | 107.994  |
| $L_1$           | 93.831   | 91.278   | 101.526  | 99.607   |
| $SNR_2/dB$      | 39.447   | 39.207   | 40.132   | 39.966   |

### 3.3 偏振测量精度

仪器响应求得的线偏振度与标准线偏振态生成

器的理论线偏振度的差值，定义为仪器的偏振测量精度：

$$A_p = P_1 - P_2 \quad (19)$$

式中： $P_1$ 为仪器实测的线偏振度； $P_2$ 为理论线偏振度。

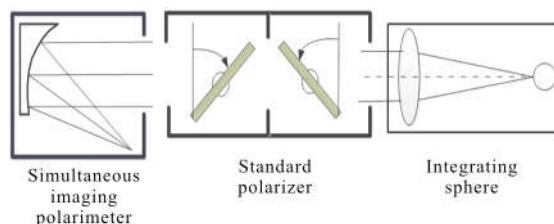


图 15 偏振测量精度检测原理图

Fig.15 Schematic diagram of linear polarization measurement accuracy test

经过偏振定标<sup>[7]</sup>，利用可调偏振度光源(VPOLs)对偏振测量精度进行验证。VPOLs 是由两块精密控角的玻璃平板组成，利用光在两介质表面反射和折射时能量重新分配。当非偏光入射，根据玻璃平板与光线的倾斜角度，可由菲涅耳公式求出出射光的线偏振度<sup>[9]</sup>，绕光轴转动玻璃平板可以改变输出偏振方位角。VPOLs 出射的标准偏振度为：

$$P_2 = \frac{A \times \cos(2\alpha) + B \times \cos(2\alpha) + C}{D \times \cos(2\alpha) + E \times \cos(2\alpha) + F} \quad (20)$$

式中： $A = -n^8 + 2n^4 - 1$ ； $B = -2n^8 + 4n^6 - 4n^2 + 2$ ； $C = 3n^8 - 2n^4 + 4n^2 - 1$ ； $D = -A + 8n^4$ ； $E = -B + 16n^6$ ； $F = -C + 8n^8$ ； $\alpha$ 为玻璃平板的倾斜角度； $n$ 为玻璃折射率。

VPOLs 出射的标准线偏振度误差主要来源于玻璃平板的倾斜角度和折射率。经标定，倾斜角度定位误差小于 5"，在系统的工作带宽内，并考虑光源的稳定性，分析得出线偏振度在 0~0.3 范围内，出射线性偏振度与理论值的差异小于  $2.0 \times 10^{-4}$ 。

同时偏振成像仪的偏振度测量公式为：

$$P_1 = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} \quad (21)$$

试验得到线偏振测量结果测量精度如表 7 所示。可以看出，线偏振测量精度优于 1% ( $P < 0.3$ )。

表 7 偏振测量精度验证结果

Tab.7 Result of polarization accuracy

| FOV/(°) | Glass angle/(°) | $P_1$   | $P_2$   | $P_1-P_2$ |
|---------|-----------------|---------|---------|-----------|
| 0       | 0               | 0.005 3 | 0.000 0 | 0.005 3   |
|         | 28              | 0.055 0 | 0.050 6 | 0.004 4   |
|         | 38              | 0.105 0 | 0.100 8 | 0.004 2   |
|         | 45              | 0.155 7 | 0.151 1 | 0.004 5   |
|         | 51              | 0.211 5 | 0.206 6 | 0.005 0   |
|         | 55              | 0.254 4 | 0.250 5 | 0.003 9   |
|         | 59              | 0.305 0 | 0.299 9 | 0.005 1   |
|         | 0               | 0.001 8 | 0.000 0 | 0.001 8   |
|         | 28              | 0.052 5 | 0.050 6 | 0.002 0   |
| 3       | 38              | 0.097 8 | 0.100 8 | -0.003 0  |
|         | 45              | 0.147 2 | 0.151 1 | -0.004 0  |
|         | 51              | 0.209 9 | 0.206 6 | 0.003 4   |
|         | 55              | 0.254 2 | 0.250 5 | 0.003 7   |
|         | 59              | 0.304 8 | 0.299 9 | 0.004 9   |
|         | 0               | 0.010 0 | 0.000 0 | 0.010 0   |
|         | 28              | 0.041 9 | 0.050 6 | -0.008 6  |
|         | 38              | 0.091 9 | 0.100 8 | -0.008 9  |
|         | 45              | 0.143 1 | 0.151 1 | -0.008 1  |
| 4.25    | 51              | 0.198 7 | 0.206 6 | -0.007 8  |
|         | 55              | 0.243 9 | 0.250 5 | -0.006 6  |
|         | 59              | 0.294 7 | 0.299 9 | -0.005 2  |

### 4 结 论

高空间分辨率的遥感偏振探测，相比传统的辐射探测方法，在对于类似海洋中船只等目标探测受耀斑、海雾、大气干扰的情况，体现出明显的优势。利用偏振信息的优势，根据实际使用需求，对技术指标进行详细的分析，进行了详细的光机设计。通过对仪器进行实验室测试，验证了仪器具有良好的成像质量和测量精度，为高分辨的动态目标偏振遥感探测奠定了基础。

### 参 考 文 献:

[1] Chen Ligang, Hong Jin, Qiao Yanli, et al. Accuracy analysis on a sort of polarized measurement in remote sensing [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(10): 2384-2387. (in Chinese)  
陈立刚, 洪津, 乔延利, 等. 一种高精度偏振遥感探测方式

的精度分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(10): 2384-2387.

[2] Garlick G F J, Steigmann G A, Lamb W E. Differential optical polarization detectors: US, 3992571[P]. 1976.

[3] Li Shuang, Qiu Zhenwei, Yang Changjiu. Preliminary study on technology of simultaneous imaging polarimetry [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, 5(3): 198-202. (in Chinese)  
李双, 裘桢伟, 杨长久. 同时偏振成像探测技术初探[J]. *大气与环境光学学报*, 2010, 5(3): 198-202.

[4] Meng Qingyu, Wang Hongyuan, Wang Yan, et al. Off-axis three-mirror freeform optical system with large linear field of view [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1018005. (in Chinese)  
孟庆宇, 汪洪源, 王严, 等. 大线视场自由曲面离轴三反光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(10): 1018005.

[5] Zhang Tingcheng, Liao Zhibo. Design of off-axis reflective optical system with 3 three mirror used in imaging spectrometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1863-1865. (in Chinese)  
张庭成, 廖志波. 离轴三反成像光谱仪光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(7): 1863-1865.

[6] Li Cuili, Sun Xiaobing, Wang Han, et al. Accuracy analysis of simultaneous polarized measurement based on polarizing beam splitter [J]. *Acte Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0412004. (in Chinese)  
李翠丽, 孙晓兵, 王涵, 等. 基于偏振分束组件的同时偏振探测精度分析[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0412004.

[7] Tao Fei, Song Maixin, Hong Jin, et al. A polarization calibration method for the simultaneous imaging polarimeter based on off-axis three mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 27(6): 0912005. (in Chinese)  
陶菲, 宋茂新, 洪津, 等. 基于离轴三反的同时全偏振成像仪的偏振定标方法[J]. *光学学报*, 2018, 27(6): 0912005.

[8] Jr Paul R Yoder. Opto-Mechanical Systems Design [M]. Translated by Zhou Haixian, Cheng Yunfang. Beijing: China Machine Press, 2008. (in Chinese)  
保罗约得. 光机系统设计 [M]. 周海宽, 程云芳, 译. 北京: 机械工业出版社, 2008.

[9] Kang Qing, Li Jianjun, Chen Ligang, et al. Test and uncertainty analysis of reference source with variable polarization degree and large dynamic range [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0412003. (in Chinese)  
康晴, 李建军, 陈立刚, 等. 大动态范围可调线性偏振度参考光源检测与不确定分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0412003.