

# 基于 PSIM 机载大视场宽谱段偏振光谱成像系统光学设计

李鑫权<sup>1,2</sup>, 张军强<sup>1,3\*</sup>, 吴从均<sup>1</sup>, 马健<sup>1,2</sup>, 卢天姣<sup>1,2</sup>, 杨斌<sup>3</sup>

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033
2. 中国科学院大学, 北京 101400
3. 长光禹辰信息技术与装备(青岛)有限公司, 山东 青岛 260000

**摘要** 为满足偏振光谱成像探测中对于大视场、宽谱段技术要求,设计了一种基于偏振强度调制技术(PSIM)的宽谱段大视场偏振光谱成像仪。针对前置望远镜组,文中对现有国内玻璃材料消色差分析,优选了可见至短波红外的复消色差玻璃,通过控制镜组中 PSIM 模块光线角度,实现大视场内在 PSIM 模块上的入射角度需求。结合分析结果,采用光学设计软件优化设计。设计结果表明,前置望远系统能够实现波段为 400~1700 nm,视场角为 72°,焦距为 20 mm, F 数为 4 的高质量成像,全谱段内探测器截止频率处传递函数优于 0.4, PSIM 模块上最大入射角度为 ±4.99°,有效保证了各视场内偏振调制的一致性。后置光谱分光系统采用基于 Offner 结构的凸面光栅,优化结果显示各波段点列图均小于一个像元,在探测器奈奎斯特频率处中心波长的 MTF 达到 0.6,各项指标均满足设计要求。本文对于基于 PSIM 宽谱段偏振光谱成像仪器的工程化具有很重要的现实意义,对宽谱段光学系统消色差设计也具有一定指导意义。

**关键词** 偏振成像光谱仪;复消色差;PSIM;凸面光栅;光学设计

中图分类号: TP731 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2024)01-0250-08

## 引言

偏振光谱成像技术作为一种新型的光学探测技术,获取的信息量相比于传统光学探测技术大大增加,逐渐在各领域得到广泛应用。将偏振光谱成像技术与无人机技术相结合而兴起的轻小型无人机偏振遥感装备,凭借其灵活性高、全天候工作、适用范围广等特点将会是未来遥感发展的主要方向<sup>[1-4]</sup>。

偏振光谱强度调制(PSIM)技术作为偏振光谱成像中的先进技术,自 1999 年由 Oka 和 Iannarilli 等学者提出之后,便受到国内外学者的广泛研究和发 展。Jones 等设计的基于 PSIM 偏振光谱仪视场角达 120°,工作波段 450~900 nm<sup>[5]</sup>;Kudenov 等设计的推扫式偏振光谱测量仪视场角为 30°×110°,工作在 VNIR 波段<sup>[6]</sup>;黄绪杰等通过多镜头拼接实现 120°视场,工作波段 410~865 nm。偏振光谱成像设备往往具有较大工作视场,这是因为大视场可以提高偏振光谱遥感的作业效率。但是仪器研制中受制于 PSIM 模块中多级波片的入射角要求不大于 5°这一特殊性能,相对于传统大视场

光学系统其设计难度将有很大提高。为解决此类问题,传统的偏振光谱仪大多使用多镜头或视场拼接的方式实现,这种设计的代价是增加系统设计复杂度的同时也对各通道图像的匹配、光谱遥感数据的准确性提出了更高的要求;而现有的广角镜头往往焦距很短且在边缘视场具有很大畸变,系统也仅能满足很小波段范围内应用<sup>[7-8]</sup>。因此采用单镜头实现时必须解决大视场宽谱段镜头的设计难题。与此同时,系统狭缝所带来的谱线弯曲问题不容忽视,设计合适的后置光谱分光系统以满足光谱分辨率也尤为重要<sup>[9-10]</sup>。

根据上述问题,本文所设计的大视场偏振光谱成像仪前置望远物镜采用单个透射镜头实现,为保证与后续的光谱分光系统无遮挡对接,系统为像方远心形式,同时,后置光谱分光系统物方数值孔径略大于前置望远系统像方数值孔径;为了顺应偏振光谱仪的发展趋势,同时提高光谱仪器适用范围,将系统光谱范围从可见光波段拓展至短波红外波段,并在 0.707 带完成复消色差,通过 ZEMAX 软件进行优化迭代给出设计结果,设计结果表明光学系统在探测器截止频率处具有较高的传递函数(MTF),满足偏振成像应用需求。

收稿日期: 2022-08-10, 修订日期: 2023-02-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61875192)和中国科学院王宽诚教育基金会资助

作者简介: 李鑫权, 1998 年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所硕士研究生

e-mail: lixinquan20@mails.ucas.ac.cn

\*通讯作者 e-mail: zhangjq@ciomp.ac.cn

# 1 光学系统参数及选型

## 1.1 光学系统设计要求

根据应用要求，载荷飞行高度为 4 km( $H$ )，波段为 0.4 ~ 1.7  $\mu\text{m}$ ，视场角为  $72^\circ$ ，探测器选用像元大小 9  $\mu\text{m}$ ，有效像元数  $4k \times 4k$  的辰芯 CMOS 芯片，根据几何光学，飞行高度  $H$ 、像元尺寸  $a$ 、地面空间分辨率  $GSD$ 、系统焦距  $f$ 、光谱维瞬时视场(IFOV)之间关系满足式(1)和式(2)。

$$f = \frac{H \times a}{GSD} \tag{1}$$

$$\text{IFOV} = \arctan\left(\frac{GSD}{H}\right) \tag{2}$$

根据应用需求及式(1)和式(2)，结合成像应用需求，得到所要求光学系统设计指标需求如表 1 所示。

表 1 光学系统指标需求

Table 1 Main parameters of optical system

Parameter	Value
Spectral range/ $\mu\text{m}$	0.4~1.7
IFOV/ $^\circ$	0.026
Field of view/ $^\circ$	72
$f/\text{mm}$	20
F/#	4
MTF(截止频率处)	$\geq 0.4$
Uniformity of illumination/%	$\geq 80$
Distortion	$\leq 15\%$
Structure type	image square telecentric
BFL/ $\text{mm}$	$> 7$

## 1.2 光学系统选型

偏振光谱成像系统的前置望远系统结构可以分为透射式和反射式。反射式系统无色差，结构紧凑，不受光学材料的限制。但是反射式系统对入射光线的偏振特性会产生较大的影响，且难以满足本指标需求的大视场需求<sup>[11]</sup>。鉴于此，本文拟选用透射结构实现，结合反远距光学系统光线走势，对于实现 PSIM 入射角度具有一定优势。如图 1 所示，负透镜组在前，入射光线的发散角相对后组来说减小，通过多级减小之后使入射光线的入射角  $\theta$  控制在  $\pm 5^\circ$  以内，在满足 PSIM 模块使用要求的前提下达到大视场的目的；同时，前组的发散使系统主面后移，可获得较长工作距。

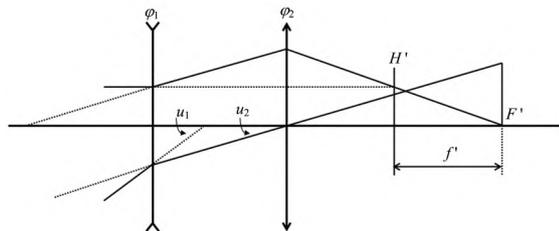


图 1 反远距系统光路图

Fig 1 Inverted telephoto system optical principle

另外，前置望远系统在实现时还需要解决以下难题。首先大视场系统在对准进行复杂化增加透镜的同时必然会增大色差矫正难度；其次较差的像面照度均匀性会降低系统的动态范围，产生中心视场过曝而边缘视场曝光不足的现象；再者，为了满足前置镜组与后续分光系统的拼接，需要实现前置系统出瞳与分光系统入瞳相匹配；最后还需要考虑系统 PSIM 模块入射角度需求和后截距等要求。

后置光谱分光系统拟采用基于 Offner 结构进行设计，这种结构具备固有像差小、结构简单的优点。图 2 所示为 Offner 系统结构图，光线从狭缝 O 入射依次经主镜 M1、凸面光栅 G 和三镜 M3 反射，从 I 处出射至像面，系统光阑位于凸面光栅 G 上，可实现像方、物方远心光路方便与前置望远系统进行对接。对于狭缝式推扫型光谱仪而言，系统色散方向垂直于入射狭缝。

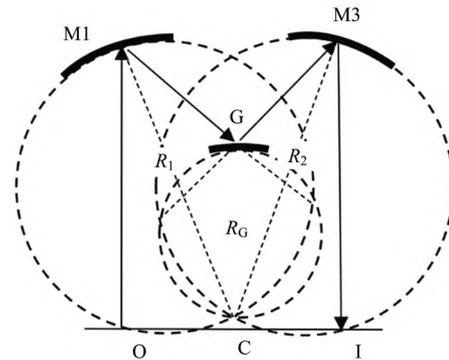


图 2 Offner 系统结构图

Fig 2 Schematic of Offner system

## 2 宽波段复消色差方法

### 2.1 常规复消色差方法

常规的色差矫正方法主要针对的是可见光，即 486 nm 的 F 光、587 nm 的 D 光以及 656 nm 的 C 光，通过三级像差理论对光学系统的初级位置色差进行推导和分析，给出对于一个由不同材料所构成的密接双透镜系统，在归一化条件下谱带边缘光线所产生的初级色差  $\Delta l'_{FC}$  和其与中心波长 D 光之间产生的二级光谱  $\Delta l'_{FDC}$  如式(3)和式(4)所表示

$$\Delta l'_{FC} = \frac{\varphi_1}{V_1} + \frac{\varphi_2}{V_2} \tag{3}$$

$$\Delta l'_{FDC} = -f' \frac{P_1 - P_2}{V_1 - V_2} \tag{4}$$

其中  $\varphi_i$  表示第  $i$  片透镜的光焦度， $f'$  为密接双薄透镜系统的焦距， $V_i$  和  $P_i$  分别表示第  $i$  片透镜的阿贝数和相对部分色散。在工作波段内阿贝数越小，光学材料的色散效应越大。相对部分色散则表征了光学材料对不同波长的色散能力，其值维持在 0 到 1 之间。

为矫正系统的初级色差以及二级光谱，应使式(3)、式(4)中的  $\Delta l'_{FC}$  和  $\Delta l'_{FDC}$  为零，体现在选择光学材料时应该选择相对部分色散相似，阿贝数数值较大的两种材料进行组合，同时对系统光焦度进行合理的分配，避免出现透镜曲率过小的情况<sup>[12]</sup>。如图 3 所示为 CDGM 玻璃材料的 P-V 图，

图中大多数的玻璃分布在正常的色散线(图中直线)附近,如若按照公式中所要求的两种玻璃材料 P 值相近, V 值相差大的要求进行色差校正几乎是难以完成的,因此需要加入偏离正常色散曲线较远的特殊色散玻璃材料,以实现色差校正。

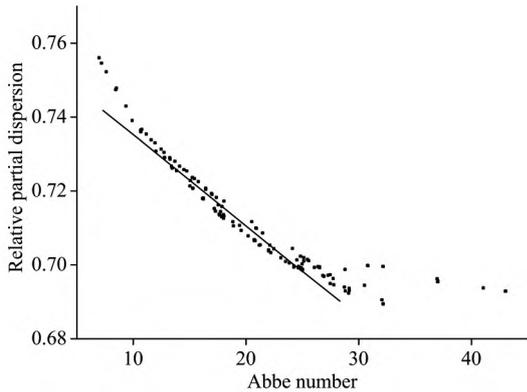


图 3 CDGM 玻璃在可见光波段 P-V 图

Fig 3 P-V diagrams of CDGM glasses in visible band

2.2 宽波段的复消色差方法

不同光学材料的折射率与波长关系呈现非线性关系,如图 4 所示,在可见光波段,光学材料的折射率变化迅速,在近红外以及短波红外范围内又变得较为缓慢。因此,光学材料在不同的工作波段内的色散性质是不一样的。

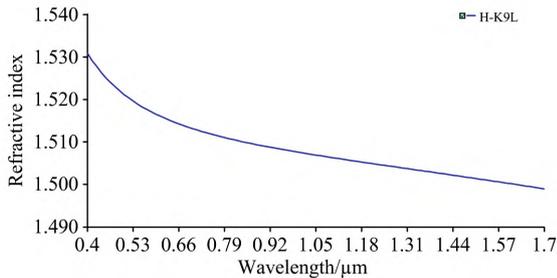


图 4 典型光学材料折射率曲线

Fig 4 Typical refractive index curve of optical material

如图 5 所示为 CDGM 玻璃材料在 1.0~1.7 μm 波段内的 P-V 图,与图 3 相比,原本近似呈现线性变化的玻璃色散线变的无迹可寻,正是由于在不同波段内材料色散特性的改变,让常规消色差方法的效果在宽波段的光学系统设计中有所降低。

针对以上问题,结合像差理论,给出宽波段光学系统的初级色差 ΔL 方程如式(5)

$$\Delta L_k = \sum \frac{\varphi_i}{v_{ki}} \tag{5}$$

式(5)中, i 表示第 i 片透镜, k 表示第 k 个波段,以本次设计的宽波段(0.4~1.7 μm)光学系统为例,分为三个波段 0.4~0.7、0.7~1.0 以及 1.0~1.7 μm,其值分别为 1、2、3。令 ΔL<sub>k</sub> 为零,为保证各个分波段消色差,同时还需保证在整个波段内,光学系统色差 ΔL 为零。综合光学系统光焦度分配公式,宽波段复消色差光学系统各元件还应满足

$$\begin{aligned} \varphi &= \sum \varphi_i \\ \Delta L &= \sum \frac{\varphi_i}{v_i} \end{aligned} \tag{6}$$

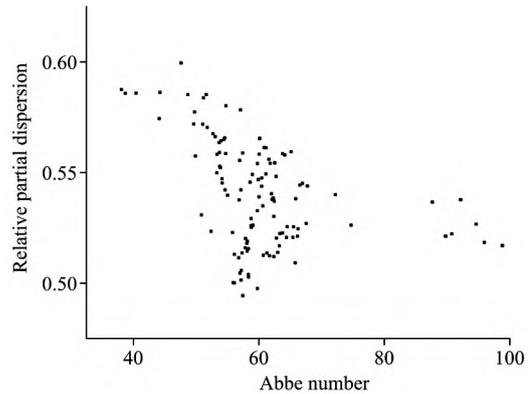


图 5 CDGM 玻璃在短波红外波段 P-V 图

Fig 5 P-V diagrams of CDGM glasses in SWIR band

综上所述,在进行宽波段光学系统设计时应考虑光学材料在各个分波段的色散性能,进行合理地组合。为了方便,规定 η=1/v,根据阿贝数定义可得

$$\eta_k = \frac{n_{k1} - n_{k3}}{n_{k2} - 1} \tag{7}$$

式(7)中, η<sub>k</sub> 表示光学材料在第 k 个波段内的色散能力, n<sub>k1</sub>、n<sub>k2</sub> 和 n<sub>k3</sub> 则分别表示第 k 波段内的最小波长、中心波长和最大波长。如表 2 所示,给出了 CDGM 部分玻璃在 0.4~1.7 μm 内的色散性能数据;通过对比, H-LAF10LA 与 H-ZLAF50E 有着相似的宽波段色散性能,但是前者在短波红外波段色散性能强,后者在可见光范围内的色散性能强; H-ZPK7 与 H-BAK7 有着相同的折射率,而后者的色散能力要强于前者; D-FK95 与 H-ZF88 则分别为低折射率低色散与高折射率高色散的玻璃,可以用来分担系统的光焦度或者当

表 2 CDGM 部分玻璃在 0.4~1.7 μm 波段内色散性能表

Table 2 Dispersion performance of some CDGM

glasses in 0.4~1.7 μm wide-band

Material	Index of refraction	Chromatic dispersive power/%			
		η <sub>1</sub>	η <sub>2</sub>	η <sub>3</sub>	η
D-FK95	1.437	2.33	0.71	1.01	1.95
H-ZPK7	1.569	3.11	0.88	1.08	2.40
H-LAF10LA	1.788	4.72	1.32	1.70	3.63
D-ZLAF50	1.802	4.95	1.34	1.61	3.68
H-ZLAF2A	1.803	4.80	1.32	1.67	3.64
H-ZLAF50E	1.804	4.82	1.32	1.65	3.64
H-ZLAF55D	1.835	5.29	1.41	1.65	3.86
H-K9L	1.517	3.43	1.08	1.71	3.00
H-K9LA	1.517	3.42	1.09	1.75	3.03
H-BAK7	1.569	3.98	1.15	1.59	3.18
H-ZF88	1.946	13.93	2.82	2.58	7.89

作色差校正元件。在更明确地了解各个玻璃的色散性能之后,据此根据系统的变化针对性的更换相应的玻璃材料更有

助于消除宽波段光学系统色差。

### 3 光学系统设计

#### 3.1 前置望远系统设计

根据设计要求和选定的反远距结构作为系统初始结构，结合对于色差玻璃的选择，经过 ZEMAX 的反复锤炼优化，得出如图 6 所示的系统初始结构，系统总长 270 mm，光束通过前三片透镜将边缘视场主光线的入射角从 36°压缩至接近 0°，在系统第六面与第七面间控制所有光线相对于光轴的夹角小于 5°以满足 PSIM 模块的使用需求。系统满足像方远心，但部分胶合镜过厚且透镜间距离过近。

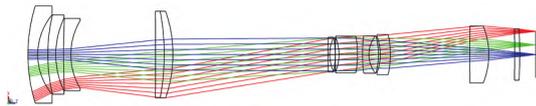


图 6 前置光学系统初始结构

Fig 6 Initial structure of front optical system

初始结构的轴向色差曲线如图 7 所示，根据宽波段消色差方法来选择合适的光学材料有明显的效果，大部分波长曲线 0.707 带相交，但是二级光谱的存在将会影响成像质量。如图 8 所示，系统的场曲在 0.5 mm 左右，边缘视场畸变达 15%。

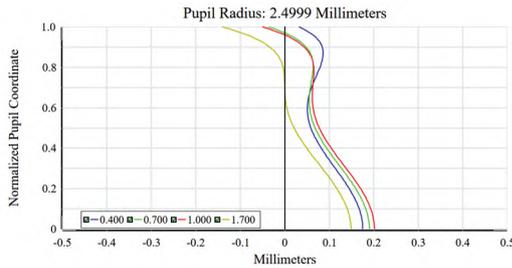


图 7 初始光学系统色差曲线

Fig 7 Chromatic aberration curve of initial optical system

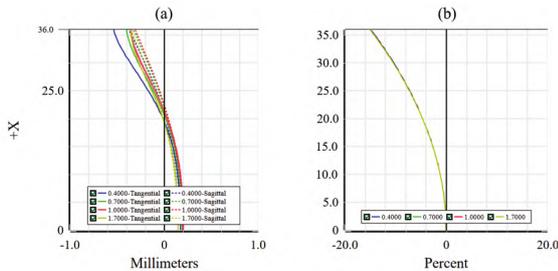


图 8 初始光学系统场曲 (a) 和畸变 (b)

Fig 8 Initial optical system field curvature (a) and distortion (b)

为了实现光学系统性能的进一步提高，通过对透镜的增加、删除以及形状优化等，优化中使用 RAGC 来控制第六面与第七面之间光线的入射角；使用 DIMX、SPHA、COMA

以及 ASTI 来分别控制系统的畸变、球差、慧差以及像散；使用 AXCL 控制色差；使用 TRAY 来控制各波长曲线在 0.707 带相交来抑制二级光谱。优化后的系统全长 274 mm，系统结构如图 9 所示。

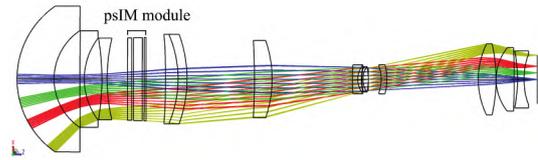


图 9 前置光学系统设计结果

Fig 9 Design result of front optical system

图 10 为光学系统相对照度图。从图中可以看出，在边缘视场 36°时相对照度  $E_R > 0.8$ ，满足系统对像面照度的要求。

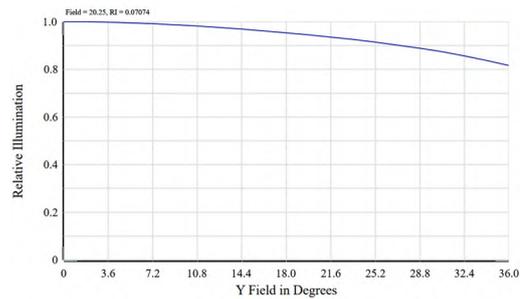


图 10 前置光学系统相对照度

Fig 10 Relative illumination of front optical system

图 11 为光学系统场曲与畸变图，相比于图 7 均有所改善，系统畸变减小到了 12% 以内。

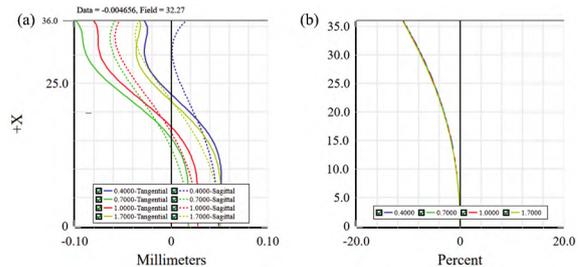


图 11 前置光学系统场曲 (a) 和畸变 (b)

Fig 11 Frontoptical system field curvature (a) and distortion (b)

光学系统 MTF 可以较为全面地反映成像性能，图 12 为本系统在截止频率处 MTF 值。从结果可以看出，传递函数接近衍射极限，在 Nyquist 频率处的 MTF 值也优于 0.4。图 13 给出了系统点列图，各个视场的 RMS 直径均小于一个像元，满足成像要求。

通过对光学系统色差的优化，系统轴向色差图以及焦移量如图 14 所示，可以看出各个波段色光在 0.707 带近乎相交，同时系统焦移在 37 μm，选择合适的像面位置，则各波段焦点均位于系统一倍焦距以内，保证了各个波段的成像质量。

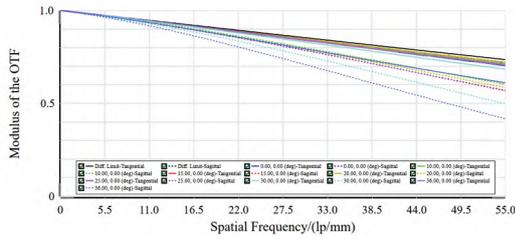


图 12 前置光学系统 MTF 曲线

Fig 12 MTF curve of front optical system

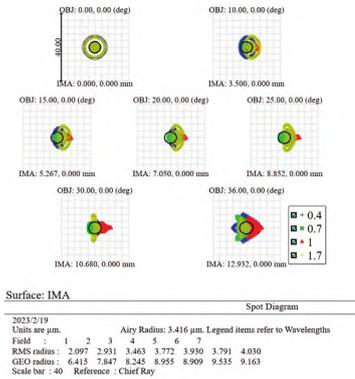


图 13 前置光学系统点列图

Fig 13 Spot diagram of front optical system

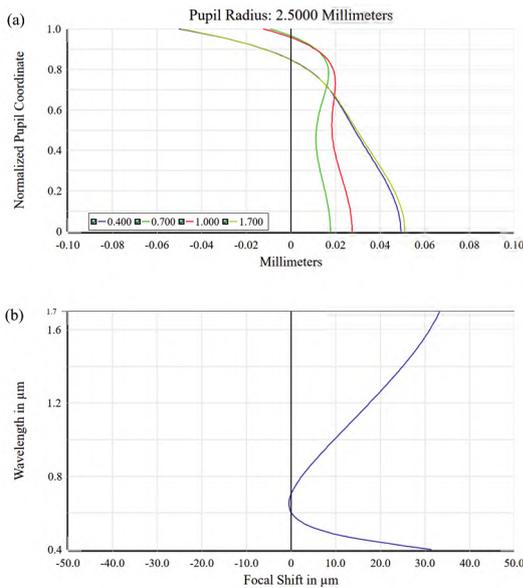


图 14 前置光学系统色差曲线 (a) 和焦移图 (b)

Fig 14 Chromatic aberration curve (a) and focal shift (b) of front optical system

光学系统在第三片透镜与第四片透镜中间插入 PSIM 模块, 所有光线与光轴夹角最大值为  $4.996^\circ$ , 所有视场在 PSIM 模块入射角度如表 3 所示, 满足调制模块应用需求。

3.2 后置光谱分光系统设计

进行 Offner 结构设计需要确定主镜、三镜与凸面光栅曲

表 3 PSIM 模块各视场最大入射角  
Table 3 The maximum incident angle of each field of view of PSIM

Field	1	2	3	4	5	6	7
Angle/( $^\circ$ )	4.917	4.957	4.983	4.996	4.990	4.944	4.863

率半径  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_G$ , 同时, 还需确定各镜面的离轴量, 根据系统指标及所采用的面阵探测器可知, 设面阵探测器光谱维长度为  $H_{spec}$ , 光谱范围为  $\Delta\lambda$ , 衍射级次为  $m$ , 光栅刻画密度为  $N(\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1})$ , 根据文献可知, 各面曲率半径求解如式 (8) 和式 (9) 所示<sup>[13]</sup>。针对各元件的离轴量, 主要通过设计同轴系统再逐次给定离轴量进行多次优化得出。

$$R_G = \frac{H_{spec}}{mN\Delta\lambda} \tag{8}$$

$$R_1 = R_2 = 2R_G \tag{9}$$

为满足光谱分光系统入瞳与前置望远系统出瞳相匹配, 将分光系统数值孔径 NA 设置为 0.13。由式计算得出分光系统参数如表 4 所示。

表 4 分光系统参数

Table 4 Parameters of dispersive light system

Technical	Value
Work wavelength/nm	400~1 700
Spectral resolution/nm	1.5
FOV/mm	30
Numerical aperture	0.13
$R_1$ /mm	100
$R_2$ /mm	100
$R_G$ /mm	50

将所得出的分光系统参数输入至 ZEMAX 软件进行优化, 同时, 为克服系统长狭缝带来的像散, 在设计过程中加入前置弯月透镜来增加优化变量, 提升系统成像质量<sup>[14]</sup>。最终设计结果如图 15 所示。图 16 展示了系统在中心波长下的 MTF 曲线, 可以看出的是所设计的 Offner 分光系统具有接近衍射极限的成像质量, 谱线弯曲和色畸变均在 5% 像元左右。

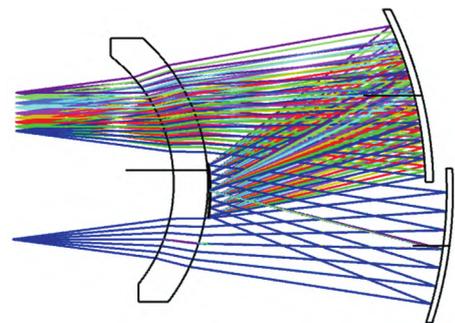


图 15 Offner 分光系统设计结果

Fig 15 Design result of Offner spectrometer

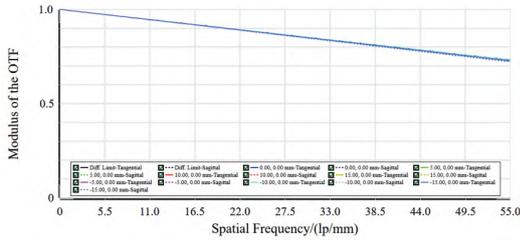


图 16 Offner 分光系统 MTF 曲线

Fig 16 MTF curve of Offner spectrometer

### 3.3 光学系统拼接结果

将前置望远系统和后置光谱分光系统拼接，得到图 17 所示的偏振成像光谱仪的最终设计结果。系统总长 362 mm，结构紧凑。系统前置望远镜组通过推扫成像将入射光通过狭缝送入光谱分光系统，最终可在探测器焦平面处获得目标的

偏振光谱图像。



图 17 光学系统设计结果

Fig 17 Design result of optical system

通过系统的点列图和调制传递函数 MTF 曲线对偏振成像光谱仪的成像质量进行评价，图 18 所示为 1 000 nm 中心波长点列图，RMS 半径均小于一个像元。图 19 所示为系统在中心波长处的调制传递函数曲线，在 Nyquist 频率 (55 lp · mm<sup>-1</sup>) 处，系统的 MTF 值达到 0.6，接近衍射极限。光学系统具有衍射受限的成像。

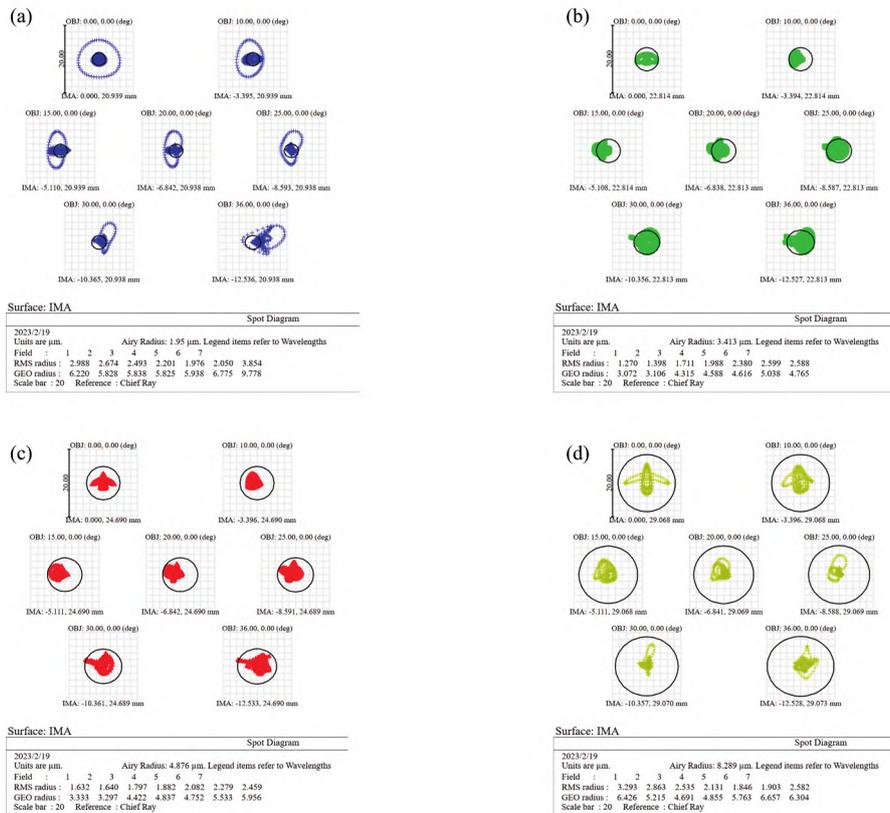


图 18 光学系统各波长点列图

(a) : 400 nm; (b) : 700 nm; (c) : 1 000 nm; (d) : 1 700 nm

Fig 18 Spot diagram of each wavelength of optical system

(a) : 400 nm; (b) : 700 nm; (c) : 1 000 nm; (d) : 1 700 nm

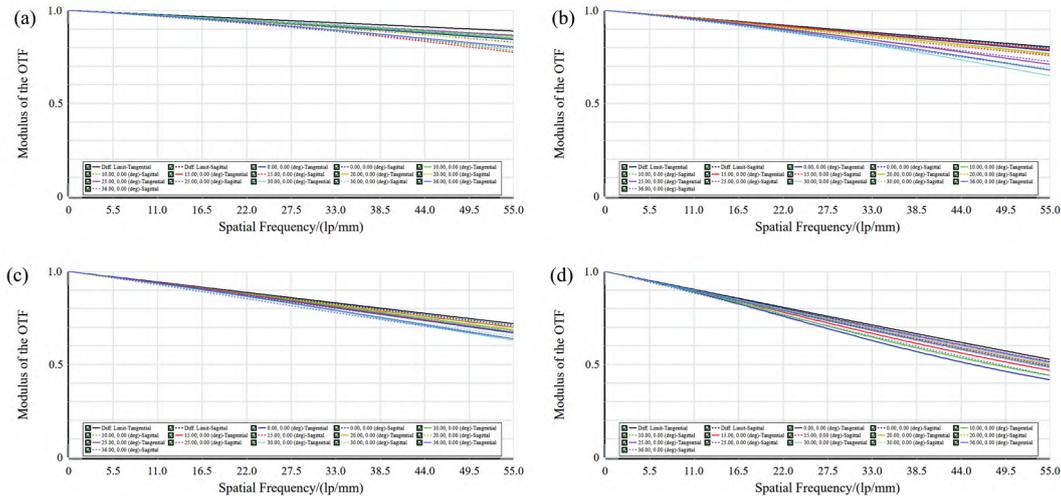


图 19 光学系统各波长调制传递函数曲线

(a): 400 nm; (b): 700 nm; (c): 1 000 nm; (d): 1 700 nm

Fig. 19 MTF curve of each wavelength of optical system

(a): 400 nm; (b): 700 nm; (c): 1 000 nm; (d): 1 700 nm

### 4 结 论

设计了一种可应用于机载的高光谱偏振成像光谱仪。光谱仪适用波段覆盖可见光至短波红外波段，视场角达到  $72^\circ$ ，焦距 20 mm，系统的像面照度达到 0.8 以上，利用宽波段消色差理论进行了前置望远镜组光学系统的色差消除，提高了系统整体的成像质量，整个系统均采用 CDGM 玻璃，系统 MTF 曲线接近衍射极限，在 PSIM 调制模块中各视场入射

光线控制在  $\pm 5^\circ$  范围内，很好的保证了各个视场偏振调制的一致性。后置光谱分光系统采用 Offner 结构的凸面光栅，通过加入弯月透镜有效地克服狭缝带来的谱线弯曲问题。

本文设计的偏振光谱成像仪对中低空的 PSIM 偏振光谱探测有着重要的应用价值，通过宽光谱的设计拓宽了机载探测的适用范围，通过提高系统视场角提高了机载探测系统的工作效率，同时可加入 PSIM 模块进行进一步的偏振光谱探测。该设计及设计方法在机载偏振成像光谱仪领域及其他光学领域具有参考和实用价值。

### References

[ 1 ] Peyghambari S, Zhang Y. Journal of Applied Remote Sensing, 2021, 15(3): 031501.  
 [ 2 ] YAN Lei, LIAO Xiao-han, ZHOU Cheng-hu, et al(晏磊, 廖小罕, 周成虎, 等). Journal of Geo-Information Science(地球信息科学学报), 2019, 21(4): 476.  
 [ 3 ] Zhao Y, Peng Q, Yi C, et al. Journal of Sensors, 2016, 2016: 5985673.  
 [ 4 ] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, et al. Applied Optics, 2006, 45(22): 5453.  
 [ 5 ] Jones S H, Iannarilli F J, Kebabian P L. Opt. Express, 2004, 12(26): 6559.  
 [ 6 ] Kudenov M W, Lowenstern M E, Craven J M, et al. Optical Engineering, 2017, 56(10): 103107.  
 [ 7 ] CHEN Jian-fa, PAN Zhi-feng, WANG He-long(陈建发, 潘枝峰, 王合龙). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2020, 49(6): 20190443.  
 [ 8 ] SONG Mao-xin, SUN Liang, HONG Jin, et al(宋茂新, 孙亮, 洪津, 等). Laser & Optoelectronics Progress(激光与光电子学进展), 2015, 52(11): 112206.  
 [ 9 ] ZHU Jia-cheng, SHEN Wei-min(朱嘉诚, 沈为民). Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报), 2019, 38(4): 04542.  
 [ 10 ] ZHU Yu-ji, YIN Da-yi, CHEN Yong-he, et al(朱雨霁, 尹达一, 陈永和, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2018, 38(2): 0222001.  
 [ 11 ] LIAO Yan-biao(廖延彪). Polarized optics(偏振光学). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2003.  
 [ 12 ] Ren D Q, Allington-Smith J R. Optical Engineering, 1999, 38(3): 537.  
 [ 13 ] WU Cong-jun, YAN Chang-xiang, LIU Wei, et al(吴从均, 颜昌翔, 刘伟, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2013, 33(8): 2272.  
 [ 14 ] SHEN Yu-hang, NI Zheng-ji, HUANG Yuan-shen, et al(沈宇航, 倪争技, 黄元申, 等). Laser & Optoelectronics Progress(激光与光电子学进展), 2021, 58(9): 0900002.

# Optical Design of Airborne Large Field of View Wide Band Polarization Spectral Imaging System Based on PSIM

LI Xin-quan<sup>1,2</sup>, ZHANG Jun-qiang<sup>1,3\*</sup>, WU Cong-jun<sup>1</sup>, MA Jian<sup>1,2</sup>, LU Tian-jiao<sup>1,2</sup>, YANG Bin<sup>3</sup>

1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China

3. Ysense Information Technology and Equipment (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao 260000, China

**Abstract** According to the technical requirements of the large field of view and wide spectral band in polarization spectral imaging detection, a wide spectral band and large field of view polarization imaging spectrometer based on Polarimetric-spectral intensity modulation (PSIM) was designed. For the front telescope group, according to the achromatic analysis of existing domestic glass materials, the achromatic glass from visible to short-wave infrared is selected. By controlling the light angle of the PSIM module in the mirror group, the incident angle demand on the PSIM module in the large field of view is realized. Based on the results of the analysis, optical design software is used to optimize the design. The design results show that the front telescopic system can achieve high-quality imaging with a wavelength range of 400~1 700 nm, a field angle of 72°, a focal length of 20 mm, and an F-number of 4. The transfer function of the detector at the cut-off frequency in the full spectrum is better than 0.4, and the maximum incidence angle on the PSIM module is  $\pm 4.99^\circ$ , effectively ensuring the consistency of polarization modulation in each field of view. The post-spectral spectroscopic system uses a convex grating based on the Offner structure. The optimization results show that the point array of each band is less than one pixel and the MTF of the central wavelength at the Nyquist frequency of the detector reaches 0.6, and all indicators meet the design requirements. This paper has important practical significance for the engineering of polarization spectral imaging instruments based on PSIM wide spectrum and also has certain guiding significance for the achromatic design of wide-spectrum optical systems.

**Keywords** Polarization imaging spectrometer; Apochromatic; PSIM; Convex grating; Optical design

\* Corresponding author

(Received Aug. 10, 2022; accepted Feb. 19, 2023)

(上接 249 页)

会务组联系方式

会议咨询: 徐周毅 电话: 13600798695, 邮箱: zhoyixu@xmu.edu.cn;

会议稿件: 林峻越 电话: 18950145766, 邮箱: jylin@xmu.edu.cn

厂商联络: 王香凤 电话: 010-58807981; 13520034335, 邮箱: xiangfeng@bnu.edu.cn

支持媒体

会议官网: 光谱网: <http://www.sinospectroscopy.org.cn> (会议各类信息以光谱网发布为准)

中国光学学会  
中国化学会  
中国光学学会光谱专业委员会  
厦门大学

2023 年 12 月 1 日