

制冷型中波红外偏振成像光学系统设计

刘星洋¹, 翟尚礼², 李 靖³, 汪 洋², 苗 锋¹, 杜瀚宇¹, 邹超凡¹

(1. 南京莱斯电子设备有限公司, 江苏南京 210014;

2. 中国电子科技集团第二十八研究所, 江苏南京 210007;

3. 31105 部队, 江苏南京 210000)

摘要: 除了具备作用距离远、可全天候工作、隐蔽性好等传统红外强度成像的优点外, 基于目标与背景偏振特性差异的红外偏振成像技术能够有效减小背景干扰、抑制背景杂波、增强图像对比度、提高信噪比, 应用前景广阔。为了有效抑制空中和海面目标探测过程的背景杂波干扰, 增强雾、霾和烟尘以及小温差、低照度和复杂背景环境下的目标探测能力, 采用分孔径同时偏振成像方式, 完成了焦距为 240 mm 的四通道制冷型分孔径中波红外偏振成像光学系统的设计。利用蒙特卡洛法进行了公差分析, 保证了光学系统加工和装调精度的合理性。像质分析结果表明, 光学系统的 MTF 接近衍射极限, 各类像差得到了有效校正, 成像质量良好。通过冷反射分析验证了冷像对所设计制冷型红外光学系统成像质量的影响程度。此外, 最终完成的光学系统结构紧凑, 透过率高, 避免了非球面的使用, 具有良好的加工和装配工艺性。

关键词: 偏振成像; 分孔径; 制冷型; 中波红外

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200208

Design of cooled medium-wave infrared polarization imaging optical system

Liu Xingyang¹, Zhai Shangli², Li Jing³, Wang Yang², Miao Feng¹, Du Hanyu¹, Zou Chaofan¹

(1. Nanjing Les Electronic Equipment Co. LTD, Nanjing 210014, China;

2. The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China;

3. 31105 Army, Nanjing 210000, China)

Abstract: In addition to the advantages of traditional infrared intensity imaging, such as long detection distance, all-weather working and good concealment, infrared polarization imaging technology based on the difference between the target and background polarization characteristics can effectively reduce background interference, suppress background clutter, enhance image contrast, improve signal-to-noise ratio, and has broad application prospects. In order to effectively suppress the background clutter interference in the process of air and sea detection, enhance the target detection ability in fog, haze and smoke, as well as the backgrounds of small temperature differences and low illumination, the design of a four channel aperture sharing medium-wave infrared polarization imaging optical system with a focal length of 240 mm was completed. Tolerance analysis was carried out by using Monte Carlo method to ensure the rationality of the precision of optical system processing and assembly. The results of image quality analysis show that the MTF of the optical system is close to the diffraction limit, aberrations have been effectively corrected, and the imaging quality is good. The influence of Narcissus effect on the imaging quality of the cooled infrared optical system was verified by Narcissus analysis. In addition,

the optical system proposed has a compact structure and high transmittance, avoiding the use of aspheric surfaces, and has good processing and assembly technique.

Key words: polarization imaging; aperture sharing; cooled; medium-wave infrared

0 引言

红外成像技术具有作用距离远、可全天候工作、隐蔽性好等优点,广泛应用于军事侦察、安防监控和导弹制导等领域。其中,红外偏振成像技术凭借其独有的优势,成为了当前研究的热点。相比于传统的红外强度成像,偏振成像技术能够显著增加探测获取目标的信息量,有效减小背景干扰,抑制背景杂波,增强图像对比度,提高信噪比^[1-3]。这对于减小环境影响,提高红外成像系统对微小温差和低热对比度目标的探测识别能力具有重要作用。

国外针对偏振成像技术的研究始于 20 世纪,1972 年, J. D. Halajian 等首次提出了偏振成像技术^[4]。1992 年 B. Ben-Dor 等对复杂地物环境的偏振特性进行了研究。2000 年,美国空军实验室对多种标准涂料的偏振特性进行了研究。2003 年,美国海军水面作战中心对水下物体的偏振特性进行了研究。2006 年,美国 Polarissensor 公司开展了利用红外偏振成像进行海上搜救的效果评估实验,结果表明:相比于红外强度成像,红外偏振成像能够显著提高人、漂浮物与海面背景的对对比度。2009 年,以色列进行了雾霾天气条件下的偏振成像实验,结果表明:偏振成像能够消减或过滤雾霾等散射介质的作用,从而改善成像质量并增加作用距离。2011 年,美国空军实验室 AFRL 在不同背景下针对小型遥控模型飞机进行了长波红外偏振成像实验,结果表明:杂乱背景下长波红外偏振成像能够提高信噪比,增强探测性能,降低虚警率^[5]。随着研究的不断深入,国外出现了许多相关成熟产品。Polaris 是专门从事偏振成像设备研制的公司,其产品已经全面覆盖了可见光、近红外、中波红外和长波红外波段。

国内在偏振成像领域起步相对较晚。2006 年,西北工业大学的都安平等搭建了偏振成像探测系统,对偏振成像探测性能进行了验证,并对相关图像融合算法进行了研究。2007 年,中国科学院安徽光学精密机械研究所的汪震等利用研发的热红外偏振成像仪对地物背景中的金属目标板等进行了偏振成像探测实

验。2010 年,北京理工大学的陈伟力等搭建了中波偏振成像实验平台,对典型场景和目标进行了偏振成像和图像融合再现实验。2014 年,浙江大学的周强等对偏振成像的图像预处理和图像融合等进行了研究,并搭建实验平台对融合效果进行了验证。2016 年,北京理工大学的王霞等利用自主研发的长波红外偏振成像系统对天空中的飞机、海面上的船只和草地上的车辆等典型目标进行了偏振成像研究^[6]。2017 年,中国工程物理研究院的王海峰等利用自主开发的高精度液晶偏振控制器研制了小型机载偏振成像系统^[7]。2018 年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的王琪等设计了一种焦距为 200 mm 的分孔径红外偏振成像光学系统^[8]; 2019 年,该研究所的张哲等基于分时偏振成像方式,实现了 25 帧/s 的准实时偏振成像^[9]。

为了有效抑制空中和海面目标探测过程的背景杂波干扰,增强雾、霾、烟尘以及小温差、低照度和复杂背景环境下的目标探测能力,从而提升中等作用距离红外探测性能,文中针对偏振成像的相关理论和实现方式进行了讨论,完成了一种结构简单紧凑、透过率高的分孔径红外偏振成像光学系统的设计,并对所设计光学系统的成像质量进行了分析。

1 偏振成像理论

用于描述光波偏振态的方法主要包括 Jones 矢量表示法和 Stokes 矢量表示法。相比于 Jones 矢量表示法,Stokes 矢量表示法中各参量具有强度量纲,可以直接被探测器探测,且由 Stokes 矢量运算的穆勒矩阵元素均为实数,有不少元素为零,运算也较简单^[10-12]。利用 Stokes 矢量描述光波偏振态的表达式如下:

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: I 与入射光强有关; Q 与水平线偏振光强有关; U 与 45° 线偏振光强有关; 而 V 与圆偏振光强有关。结合关系式 $I^2 = Q^2 + U^2 + V^2$, 在 Stokes 矢量计算中通常只求取前三个参数 I 、 Q 、 U 即可^[13, 14], 它们可以通

过下式 2 测量得到:

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_0 + g_{90} \\ g_0 - g_{90} \\ g_{45} - g_{135} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{cases} p = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \\ \alpha = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \end{cases} \quad (3)$$

式中: p 为偏振度; α 为偏振角。

式中: g_θ 表示偏振片旋转 θ 时的偏振态图像。

则用于表征偏振特性的参数分别为:

2 各类偏振成像方式对比

偏振成像主要实现方式及其特点如表 1 所示^[15]。

表 1 偏振成像实现方式及特点

Tab.1 Realization and characteristics of polarization imaging

Imaging method		Advantages	Disadvantages
Time-sharing polarization imaging	Rotating polarizer	Simple system structure; Low cost; Small energy loss; High spatial resolution	Poor real-time performance; Poor reliability of moving parts
	Electrically tuned LCD	Simple system structure; Small size; Easy to adjust; High spatial resolution	Poor real-time performance; Large energy loss
Simultaneous polarization imaging	Amplitude sharing	Good real-time performance; High spatial resolution	Complex structure; High adjustment requirements; Big size; Large energy loss; High cost
	Aperture sharing	Good real-time performance; Relatively low cost; Compact structure	Relatively complex structure; Loss of spatial resolution
	Focal plane sharing	Good real-time performance; Small size; Compact structure; High integration	High adjustment requirements; Instantaneous field of view error; Loss of spatial resolution

通过对比可知, 分时偏振成像方式的实时性较差, 无法针对运动目标进行探测, 严重制约了其应用范围。同时偏振成像方式则都具有很好的实时性, 其中分振幅偏振成像方式, 系统结构复杂, 能量损失严重, 成本很高, 综合性能较差; 分焦平面偏振成像方式具有集成度高、体积小等优点, 是未来发展的趋势, 但目前整体性能受限于分焦平面探测器的制备工艺及其他一些关键技术; 而分孔径偏振成像方式能够在一定程度上兼顾技术可行性和偏振探测性能, 因此文中选用该种方式实现偏振成像探测。

3 分孔径偏振成像光学系统设计

为了实现 Stokes 参量的测量, 分孔径中波红外偏振成像光学系统需要具有四个通道, 分别用于获取 0° , 45° , 90° 和 135° 的偏振图像。根据实际使用需求确定的具有中等作用距离探测能力的分孔径中波红外偏振成像光学系统的相关参数如表 2 所示。

1) 光学材料

光学材料选择中波红外波段最常用的硅和锗。这两种材料不仅在中波红外波段具有很高的透过率, 还具备高折射率和低色散的显著优点, 更加利于系统像差的校正。

表 2 光学系统性能参数

Tab.2 Parameters of the designed optical system

Parameter	Value
Wavelength/ μm	3.7-4.8
Focal length/mm	240
$F^\#$	6
Field($^\circ$)	1.15 \times 0.92
Number of pixels	320 \times 256
Pixel size/ μm^2	30 \times 30

2) 红外偏振片

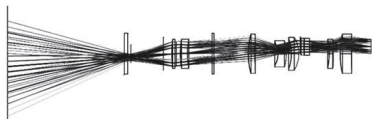

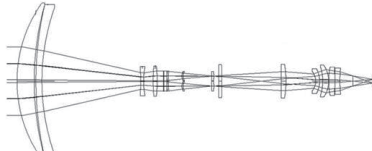
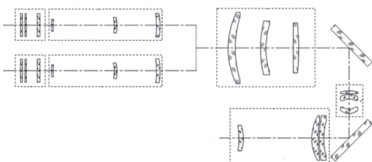
红外偏振片是获取不同方向偏振分量, 实现偏振成像的关键光学元件。通过分析各类偏振片的综合性能, 最终选用在增透膜硅基底上沉积线性间隔的线栅图案制备而成的线栅偏振片, 具体为 THORLABS 公司的硅基底中红外线栅偏振片, 其工作波段为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$, 外径为 $\Phi 25 \text{ mm}$, 消光比大于 $1000 : 1$, 在特定波长范围平均透射率大于 85% 。

3) 光学设计

调研相关文献, 总结得到的中波红外分孔径偏振成像光学系统的结构如表 3 所示。通过分析可知, 已报道的中波红外分孔径偏振成像光学系统普遍采用分孔径阵列组设置于平行光路的结构形式。该种结

表 3 中波红外分孔径偏振成像光学系统比较

Tab.3 Comparison of aperture sharing medium-wave infrared polarization imaging optical system

Structure of polarization imaging optical system	Number of optical elements per channel	Transmittance estimation
	12 lenses 1 polarizer	52.4%
	10 lenses 1 polarizer	56.8%
	13 lenses 1 polarizer	50.2%
	12 lenses 2 wave plates 1 polarizer	<48.3%

注: 根据当前红外透镜镀膜工艺水平以及线偏振片的性能, 透过率估算过程中取红外透镜单面透过率为98%, 偏振片透过率为85%

构形式需要增加额外的准直镜组, 或者需要将分孔径阵列组设置在光学系统最前端。准直镜组会进一步降低系统透过率, 加剧偏振片透过率低造成的负面影响, 同时也会增加光学系统长度; 而分孔径阵列组设置在光学系统最前端的结构形式, 会显著增加分孔径阵列组的直径, 相应的需要更大口径的偏振片与之适配。

为了提升分孔径偏振成像光学系统的性能, 文中针对中波红外偏振成像光学系统的结构形式进行了改进, 所设计分孔径中波红外偏振成像光学系统主要由物镜组、分孔径阵列组和二次成像组组成, 如图 1 所示。其中, 物镜组采用远摄物镜结构形式, 能够在较大程度上压缩光学系统的轴向尺寸。分孔径阵列组主要包括偏振片和透镜组。将分孔径阵列组布置

在物镜组后的结构形式, 能够减小分孔径阵列的半径, 使得小口径偏振片就能够满足使用需求, 同时也控制了整个光学系统的体积。此外, 这样的结构形式有利于减小分孔径阵列的偏心程度, 更容易实现像差校正。而二次成像组能够压缩物镜组的口径, 保证 100% 冷光阑匹配效率。分孔径中波红外偏振成像光学系统在工作过程中, 入射光束通过共口径物镜组以及四个偏心分孔径阵列组分别获得四幅偏振图像, 然后通过二次成像组将偏振图像同时成像到焦平面探测器的不同区域。

在分孔径中波红外偏振成像光学系统初始结构设计过程中, 主要依据以下物像关系和焦距计算公式确定相关参数:

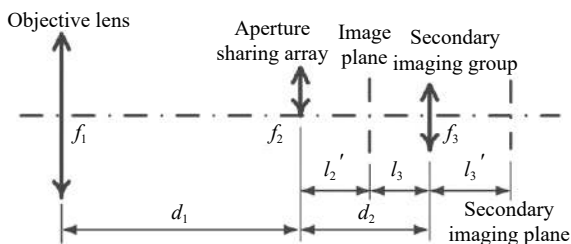


图 1 分孔径中波红外偏振成像光学系统初始结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of initial structure of aperture sharing medium-wave infrared polarization imaging optical system

$$l'_1 = f_1 \tag{4}$$

$$l_2 = l'_1 - d_1 \tag{5}$$

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{l_2} - \frac{1}{l'_2} \tag{6}$$

$$d_2 = l_2 - l_3 \tag{7}$$

$$\frac{1}{f_3} = \frac{1}{l_3} - \frac{1}{l'_3} \tag{8}$$

$$f_1 = \frac{f_1 \cdot f_2}{f_1 + f_2 - d_1} \tag{9}$$

$$f = f_1 \cdot \frac{l_3}{l_3} \quad (10)$$

确定的初始结构参数为: $f_1=300 \text{ mm}$, $f_2=200 \text{ mm}$, $f_3=18.44 \text{ mm}$, $d_1=200 \text{ mm}$, $d_2=67.13 \text{ mm}$ 。

经过迭代优化, 最终完成的分孔径偏振成像光学系统结构如图 2 所示。该光学系统结构简单紧凑, 体积与同规格的常规红外光学系统接近, 系统全长为 318.85 mm; 采用 7 片透镜完成了分孔径中波红外偏振成像光学系统单通道像差校正的工作, 透过率有了很大提升, 能够达到 64.1%, 从而有效弥补了偏振片导致的系统透过率损失, 保证了偏振成像光学系统具有优良的探测性能。

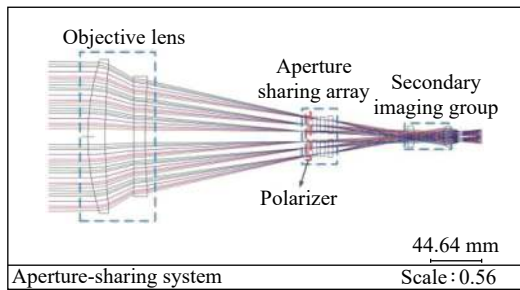


图 2 分孔径中波红外偏振成像光学系统二维布局图

Fig.2 2D layout of aperture sharing medium-wave infrared polarization imaging optical system

分孔径偏振成像光学系统的三维模型如图 3 所示。

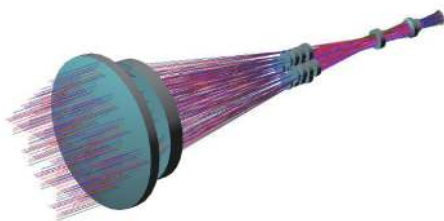


图 3 分孔径中波红外偏振成像光学系统三维布局图

Fig.3 3D layout of aperture sharing medium-wave infrared polarization imaging optical system

在中波红外分孔径偏振成像光学系统优化设计过程中, 充分考虑了镜片加工的成本和工艺性, 完全采用球面镜进行设计, 避免了非球面的引入, 同时也保证了每个镜片具有合适的中心厚度和边缘厚度。

所设计分孔径中波红外偏振成像光学系统的每个通道分别成像在红外焦平面探测器的 1/4 面积上,

与之对应的光束在入瞳处的分布如图 4 所示。

4) 像质分析与评价

为了客观评价所设计分孔径光学系统的成像质量, 分别就光学系统单通道的点列图、MTF 和像差曲线进行了分析, 结果如图 5~7 所示。由于分孔径阵列组的偏心导致光学系统的每个通道不再具备旋转对称性, 为了保证像质分析结果的全面性和准确性, 分别在 X 和 Y 两个方向进行了分析。

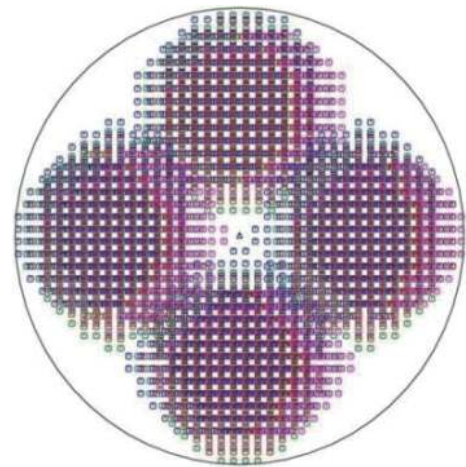


图 4 中波红外偏振成像光学系统入瞳处分孔径结果

Fig.4 Results of the pupil distribution in the medium-wave infrared polarization imaging optical system

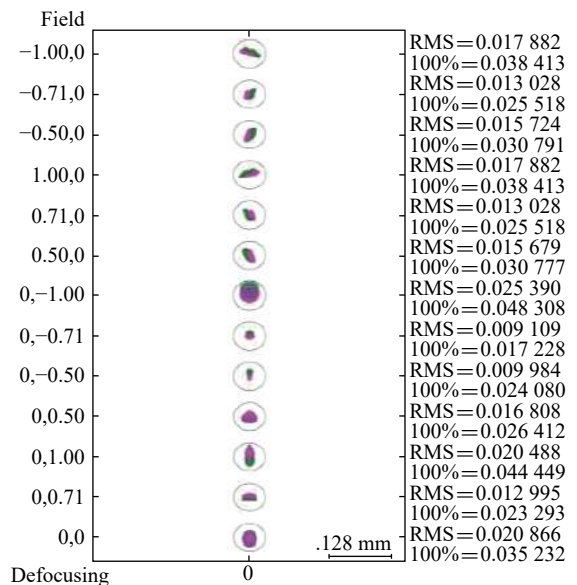


图 5 分孔径中波红外偏振成像光学系统单通道点列图

Fig.5 Spot diagram of single channel of aperture sharing medium-wave infrared polarization imaging optical system

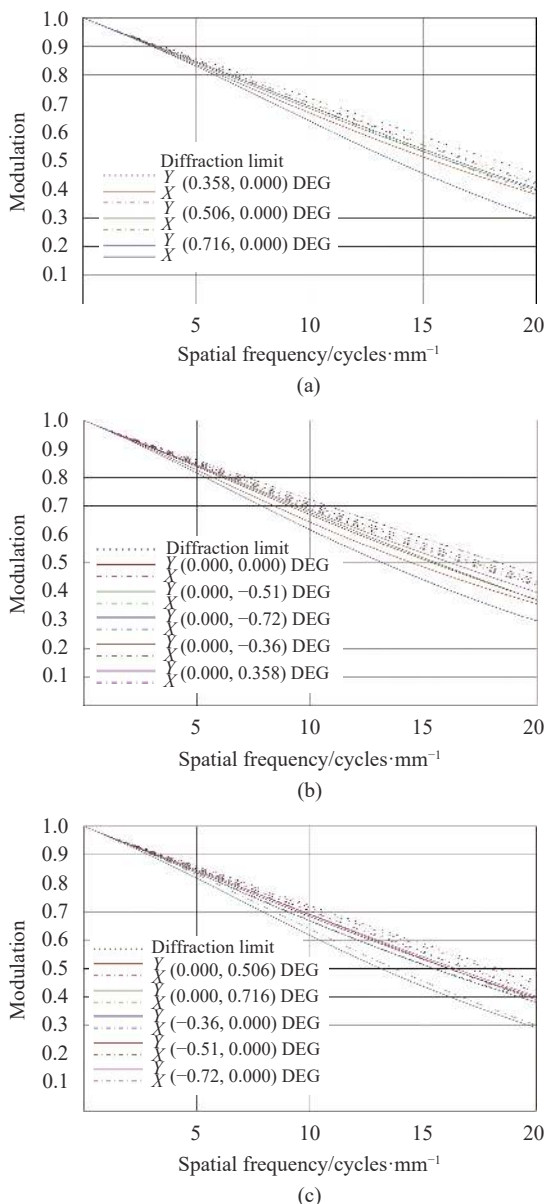


图 6 分孔径中波红外偏振成像光学系统单通道 MTF 图

Fig.6 MTF of single channel of aperture sharing medium-wave infrared polarization imaging optical system

通过分析可知, 各个视场的点列图 RMS 直径小于艾里斑直径, MTF 接近衍射极限, 各类像差得到了较好的校正, 成像质量良好, 能够满足使用要求。

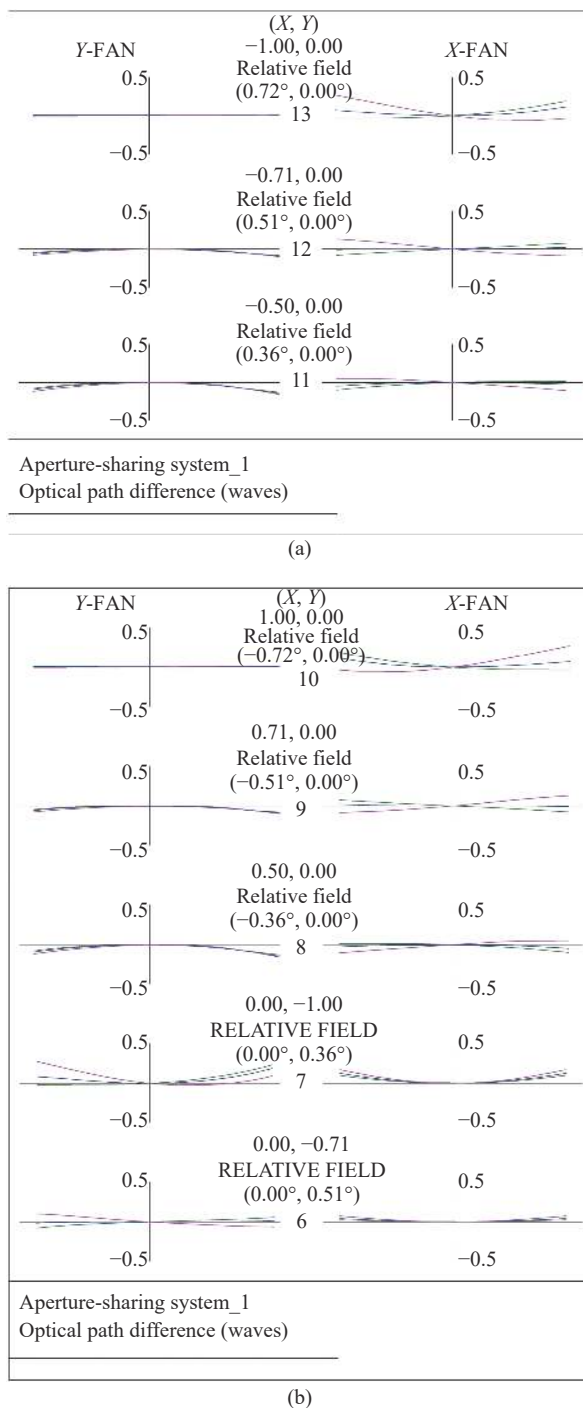
5) 公差分析

为了合理确定制冷型中波红外偏振成像光学系统的加工和装调精度, 在保证光学系统性能和指标满足使用要求的同时, 有效控制其生产成本和难度, 文中采用蒙特卡洛法进行了公差分配与分析, 公差分配结果如表 4 所示。

对分析结果进行统计, 能够得到不同视场下的累积概率曲线。图 8 所示分别为系统 0° 和 $\pm 0.73^\circ$ 视场的累积概率曲线。从图中可知, 光学系统的 MTF 达到设计值的 80% 的概率大于 82%, 能够满足使用要求。

6) 冷反射分析

对于中波红外波段的制冷型光学系统, 其探测器的制冷器会作为冷光源向外辐射, 冷光线被光学系统的光学界面微弱反射后返回探测器, 从而形成



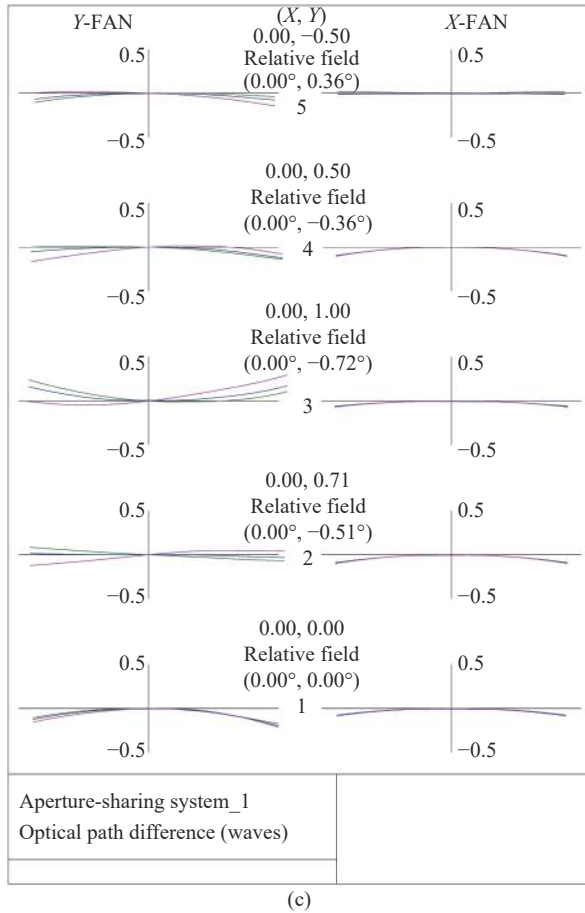


图 7 分孔径中波红外偏振成像光学系统单通道像差曲线

Fig.7 OPD of single channel of aperture sharing medium-wave infrared polarization imaging optical system

表 4 公差分配表

Tab.4 Tolerance limits

	Surface	Tolerance
Test plate fit	1-16	2
Irregularity	1-16	0.5
Thickness/mm	1-16	0.02
Decenter/mm	1-16	0.02
Tilt/(")	1-4	30
	5-16	40

自身冷像。冷反射的存在会影响光学系统的成像质量,因此,在制冷型中波红外光学系统设计过程中要充分考虑并在最大程度上减小冷反射效应的影响。通常利用 YNI 和 I/IBAR 两个参数来评价光学系统各个表面产生冷反射的强度。当 YNI 和 I/IBAR 均小于 1 时,该面可能产生冷反射。表 5 为所设计制冷型中波红外偏振成像光学系统的冷反射分析结果。

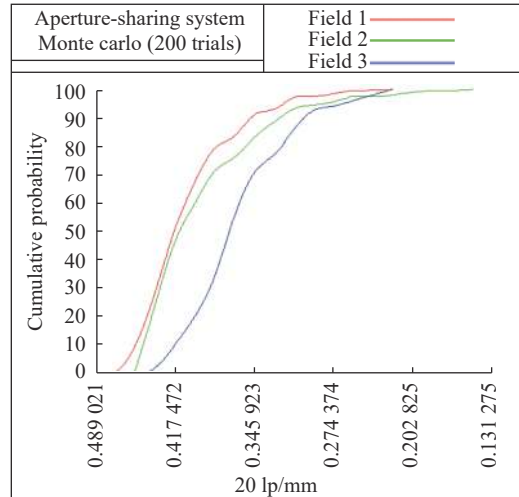


图 8 公差分析统计结果

Fig.8 Statistical results of tolerance analysis

表 5 冷反射分析结果

Tab.5 Result of cold reflection analysis

Surface	Clipping aperture	YNI/mm	I/IBAR
1	13 (R)	1.726	3.85
2	13 (R)	-2.12	1.924
3	13 (R)	-2.206	2.024
4	13 (R)	-0.623	1.283
5	13 (R)	-0.395	1.578
6	13 (R)	-0.393	1.578
7	13 (R)	0.486	-1.887
8	13 (R)	0.096	-0.382
9	13 (R)	-0.95	4.703
10	13 (R)	-0.416	1.845
11	13 (R)	-0.471	2.253
12	13 (R)	-0.919	5.709
13	20 (R)	0.169	2.086
14	20 (F)	0.043	-0.249
15	20 (R)	0.693	2.647
16	20 (F)	0.167	-1.241

根据冷反射分析结果,第 8、14 两个面有可能产生比较严重的冷反射效应。为此,采用反向追迹光线法对这两个面进行分析。分析结果如图 9 所示。

通过光线追迹分析可知,第 8 个面反射回去的光线聚焦到像面前 121.9 mm,第 14 个面反射回去的光线聚焦到像面后 223.8 mm 处,均没有聚焦到像面上。因此,不会产生严重的冷反射。

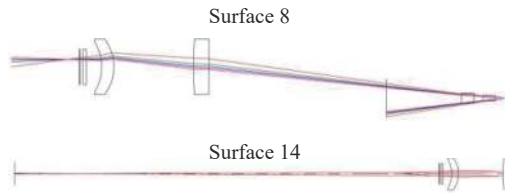


图 9 冷反射光线追迹图

Fig.9 Schematic diagram of cold reflection ray-tracing

4 结 论

与传统红外强度成像相比,基于目标与背景偏振特性差异的红外偏振成像技术能够有效减小背景干扰、增强图像对比度、提高信噪比,在空间目标态势感知、海面目标监测、雾、霾和烟尘以及小温差、低照度和复杂背景环境下目标探测等领域优势明显。通过对各种偏振成像方式的分析和比较,同时兼顾技术可行性和偏振成像探测性能,文中采用了分孔径同时偏振成像方式,完成了基于 Stokes 矢量表示法的焦距为 240 mm 的分孔径中波红外偏振成像光学系统的设计。

所设计分孔径中波红外偏振成像光学系统具有以下优点:(1)结构简单紧凑,系统透过率高,体积与同规格的常规红外成像光学系统接近;(2)设计过程没有使用非球面,降低了镜片加工难度和成本;(3)光学设计过程中限制了各个透镜的中心厚度和边缘厚度,保证了透镜具有良好的加工和装配工艺性;(4)通过合理的光学设计,消除了偏心分孔径阵列组带来的额外像差,保证了整个光学系统具有良好的成像质量。

参考文献:

[1] Zhang Xiaojie, Liu Sha, Liu Xiang. Evaluation of background suppression method based on polarization fusion [J]. *Aerospace Shanghai*, 2019, 36(1): 23-28. (in Chinese)
 张晓杰, 刘莎, 刘翔. 基于偏振信息融合的背景抑制方法评价[J]. 上海航天, 2019, 36(1): 23-28.

[2] Bao Fucheng, Duan Jin, Dong Suoqin, et al. Experimental study on polarization imaging characteristics of underwater targets [J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(1): 27-32. (in Chinese)
 鲍富成, 段锦, 董锁芹, 等. 水下目标物偏振成像特性研究[J]. 应用光学, 2019, 40(1): 27-32.

[3] Felton M, Gurton K P, Pezzaniti J L, et al. Measured comparison of the crossover periods for mid- and long-wave IR (MWIR and LWIR) polarimetric and conventional thermal imagery [J]. *Optics Express*, 2010, 18(15): 15704-15713.

[4] Tyo J Scott, Goldstein D L, Chenault D B, et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5453-5469.

[5] Yue Zhengan. U.S. Army Research Laboratory is developing military thermal infrared polarization imaging technology [J]. *Infrared*, 2019, 40(4): 39-41. (in Chinese)
 岳桢干. 美国陆军研究实验室正在研发军用热红外偏振成像技术[J]. 红外, 2019, 40(4): 39-41.

[6] Wang Xia, Liang Jian'an, Long Huabao, et al. Experimental study on long wave infrared polarization imaging of typical background and objectives [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0704002. (in Chinese)
 王霞, 梁建安, 龙华宝, 等. 典型背景和目标的长波红外偏振成像实验研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 0704002.

[7] Wang Haifeng, Hu Qiqi, Duan Jiashu. Development and applications of small airborne polarization imaging system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(11): 1075-1082. (in Chinese)
 王海峰, 胡奇琪, 段佳著. 小型机载偏振成像系统研制及应用研究[J]. 光电工程, 2017, 44(11): 1075-1082.

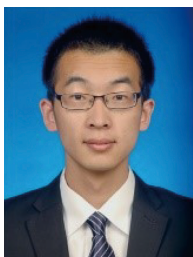
[8] Wang Qi, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu, et al. Design of decentered aperture-divided optical system of infrared polarization imager [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(1): 92-99. (in Chinese)
 王琪, 梁静秋, 梁中翥, 等. 分孔径红外偏振成像仪光学系统设计[J]. 中国光学, 2018, 11(1): 92-99.

[9] Zhang Zhe. Long-wave infrared polarization imaging and experimental study[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
 张哲. 长波红外偏振成像及实验研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2019.

[10] Zhao Yongqiang, Ma Weimin, Li Leilei. Progress of infrared polarimetric imaging detection [J]. *Flight Control & Detection*, 2019, 2(3): 77-84. (in Chinese)
 赵永强, 马位民, 李磊磊. 红外偏振成像进展[J]. 飞控与探测, 2019, 2(3): 77-84.

[11] Huang Fei. Research on key technologies of infrared polarization detection[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physical, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
 黄飞. 红外偏振探测关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2018.

- [12] Zhang Jiamin, Shi Dongfeng, Huang Jian, et al. Application of image fusion in polarization correlated imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 1226002. (in Chinese)
张家民, 时东锋, 黄见, 等. 图像融合在偏振关联成像中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(12): 1226002.
- [13] Jia Guowei, Yu Xiaofeng, Hong Pu. A method of eliminating cold reflection in infrared polarization imaging [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2018, 16(5): 48-54. (in Chinese)
贾国伟, 俞小峰, 洪普. 一种红外偏振成像中的冷反射去化方法[J]. *光学与光电技术*, 2018, 16(5): 48-54.
- [14] Ma Yan, Zhang Chaozi, Liu Ye, et al. Polarization imaging of space target based on bicubic interpolation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(12): 2555-2563. (in Chinese)
马岩, 张超子, 刘也, 等. 采用双三次插值的空间目标偏振成像[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(12): 2555-2563.
- [15] Wang Xia, Xia Runqiu, Jin Weiqi, et al. Technology progress of infrared polarization imaging detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3175-3182. (in Chinese)
王霞, 夏润秋, 金伟其, 等. 红外偏振成像探测技术进展[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(10): 3175-3182.



第一作者简介: 刘星洋 (1988-), 男, 博士。入选江苏省“双创博士”。研究方向为精密机械设计、红外光学系统设计以及红外传能光纤传输特性的研究, 主要从事光电侦察/对抗设备的研制工作。Email: email_lxy@126.com



导师简介: 翟尚礼 (1972-), 男, 研究员, 研究方向为系统设备、雷达数据录取设备及光电系统。主要从事雷达数据处理, 红外预警侦察装备的总体论证工作。获得省部级一等奖 2 项, 省部级二等奖 1 项。