文章编号 2095-1531(2018)01-0092-08

分孔径红外偏振成像仪光学系统设计

王 琪[1,2],梁静秋[1],梁中翥[1*],吕金光[1],王维彪[1*],秦余欣[1],王洪亮[1,2]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:为了在复杂及伪装的红外背景中识别出小温差目标,本文提出了一种基于分孔径的偏振成像系统结构,并对分孔径偏振成像系统所采用的分孔径成像系统及中继成像系统进行了设计研究。首先,根据 Stokes 矢量介绍了系统的工作理论和光学结构;其次,在现有探测器的结构参数要求下,计算出了光学系统的偏心量等参数,选择硅、锗作为透镜材料。在此基础上,确定了分孔径成像系统结构和中继成像系统结构。接着使用离轴偏心多重结构设计方法对初始结构进行了优化,研究了将普通红外物镜转变为具有实入瞳的像方远心结构的方法;最后,完成了分孔径成像系统和中继成像系统的整体系统匹配。设计结果表明,整体系统的调制传递函数在探测器奈奎斯特频率为 17 lp/mm 处大于 0.6,能够满足系统的设计要求。本文设计的结构可以对探测目标实现实时偏振成像,且具有结构紧凑的优点。

关 键 词:偏振成像;中波红外;分孔径;光学设计
中图分类号:O439 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20181101.0092

Design of decentered aperture-divided optical system of infrared polarization imager

WANG Qi[1,2], LIANG Jing-qiu[1], LIANG Zhong-zhu[1*], LV Jin-guang[1],
WANG Wei-biao[1*], QIN Yu-xin[1], WANG Hong-liang[1,2]
(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: liangzz@ciomp.ac.cn*

Abstract: In order to identify the target with little temperature difference in complicated and disguised infrared background, a decentered aperture-divided polarization imaging system is introduced in this paper. The design of decentered aperture-divided imaging system and relay imaging system adopted in decentered aperture-divided polarization imaging system are also studied. Firstly, the working theory and optical structure of the system

收稿日期:2017-08-11;**修订日期**:2017-10-13
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61575193, No. 61376122, No. 61027010, No. 61627819),吉林省科技发展计划资助项目(No. 20150520101JH, No. 20150101049JC, No. 20150204072GX, No. 20130206010GX),长春市科技计划资助项目(No. 2013261),应用光学国家重点实验室开放基金资助项目
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61575193, No. 61376122, No. 61027010, No. 61627819), Jilin Provincial Science and Technology Development Plan (No. 20150520101JH, No. 20150101049JC, No. 20150204072GX, No. 20130206010GX), Changchun Science Development Plan (No. 2013261), Open Fund of State Key Laboratory of Applied Optics, CIOMP

are introduced according to the Stokes vectors. Secondly, the parameters of the optical system such as the eccentricity are calculated under the requirements of the structural parameters of the existing detectors in the laboratory, and silicon and germanium are selected as the lens materials. According to these parameters, both the structure of aperture-divided imaging system and that of relay imaging system are determined on this basis. Then the off-axis eccentric multi-structure design method is used to optimize the initial structure. The transformation method from ordinary infrared objective to image-side telecentric structure with real entrance pupil is studied. Finally, the overall system matching of aperture-divided imaging system and relay imaging system is completed. The results show that the overall system modulation transfer function(MTF) at Nyquist frequency of the detector of 17 lp/mm is greater than 0.6, which can meet the system design requirements. The structure introduced in this paper can detect the real-time polarization of the target, and possesses the advantages of compact structure.

Key words: polarized imaging; mid-infrared; aperture-divided; optical design

1　引　言

红外偏振成像技术可在传统的红外强度成像基础上探测目标的偏振信息,从而准确地区分出辐射能量相同而偏振态不同的两个物体,增强目标与背景的对比度。还可根据地物与人造目标偏振度的不同,进行目标探测和地物识别[1-2]。目前,该技术已广泛应用于军事反伪装遮蔽、空间遥感以及光学监测等许多方面。

国际上早在 20 世纪 60 年代就开始了对偏振探测技术的研究。1972 年,J. D. Halajian 和 H. B. Hallock 在专利中首次提出了偏振成像技术[3]。1981 年,Walraven 最早报道了可见光波段的偏振成像仪。由于红外偏振成像技术对识别地物,分辨红外伪装防护,探测小温差目标均有重要意义,国际上开始了红外偏振成像仪的研究。1974 年,美国 Johnsonian 将偏光棱镜放置在热红外相机之前改善其工作特性[4]。20 世纪 90 年代,研究者将日本冈山天文台的近红外相机与偏振器件组合,依次旋转偏振片获得线偏振分量,实现了近红外偏振成像探测[5]。我国在红外偏振成像方面起步稍晚,2009 年,国防科技大学利用 3 个探测器实现了红外偏振实时探测,对人工遮蔽进行了红外偏振成像实验[6]。2012 年,昆明物理研究所分别探测目标的中波与长波红外偏振信息,通过对照实验,分析发现,中波红外测得的偏振信息更为准确,误偏振信息较少[7]。

按照偏振图像时间特性的不同,红外偏振成像仪可被分为实时型和非实时型两种类型。非实时偏振成像技术是在连续的时间内依次得到目标的多幅偏振图像;而实时偏振成像技术则是在单次曝光中得到目标多幅不同偏振状态的图像[8],具有实时性好,结构简单紧凑等优点。本文提出了一种实时分孔径红外偏振成像系统,并对具有偏心量的分孔径成像系统和与红外探测器匹配的中继成像系统进行了设计研究。整合两个光学系统,给出设计结果并分析成像质量。

2　基本原理

2.1　偏振态的描述

Jones 矢量法和 Stokes 矢量法是常用的定量表示偏振度的方法[9]。自然界中,非偏振光经过物体发生辐射和反射后,出射光大多数为部分偏振光,而 Jones 矢量法只能描述完全偏振光,故在偏振成像探测中,选用 Stokes 矢量法,既能描述完全偏振光,又能描述部分偏振光及非偏振光[10]。

Stokes 矢量法利用 $\boldsymbol{I}$、$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{U}$、$\boldsymbol{V}$ 4 个强度参量来描述光的偏振态[11]:

$$\boldsymbol{S} = [\boldsymbol{I}\ \boldsymbol{Q}\ \boldsymbol{U}\ \boldsymbol{V}]\ . \tag{1}$$

线偏振成像是只得到目标的 I、Q、U 3 个分量,而圆偏振成像则是在此基础上得到圆偏振光分量。在自然界中,圆偏振信息基本为 0,因此对于非人造物,探测前 3 个 Stokes 矢量足以表达目标的偏振特性[12]。

通过光学器件的出射光束 Stokes 矢量与入射光束 Stokes 矢量成线性函数关系：

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{I}' \\ \boldsymbol{Q}' \\ \boldsymbol{U}' \\ \boldsymbol{V}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{I} \\ \boldsymbol{Q} \\ \boldsymbol{U} \\ \boldsymbol{V} \end{bmatrix} = \boldsymbol{M} \begin{bmatrix} \boldsymbol{I} \\ \boldsymbol{Q} \\ \boldsymbol{U} \\ \boldsymbol{V} \end{bmatrix}, \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{M}$ 矩阵是 4×4 的 Muller 矩阵，它表征了光学元件对入射光的偏振影响，包括衰减、延迟等[13]，将通过偏振元件前后的光束联系起来。将探测器上测得的 Stokes 矢量与偏振元件的 Mueller 矩阵做逆运算，即得到入射光 Stokes 矢量，可解调出目标物体的偏振态。

2.2 红外偏振成像仪工作原理

本文设计的分孔径红外偏振成像系统的工作原理如图 1 所示，主要包括分孔径成像系统和中继成像系统，其中，分孔径系统由偏振元件和透镜阵列组成。该系统是二次成像系统，某时刻目标反射的光进入系统，经过偏振通道和分孔径成像系统分成 4 个通道，利用中继成像系统将 4 束光成像到探测器焦平面上。其中，各子系统分别放置方向不同的偏振器件和相同的透镜阵列，利用透镜阵列组将光束离轴分成 4 个通道，缩小除偏振度外每个通道之间的成像差异。它作为整个系统的核心部分实现了偏振成像仪的轻小化，但设计仍存在难点，如离轴透镜阵列的分布及后置成像物镜与探测器的配准等问题需要在设计中着重解决。

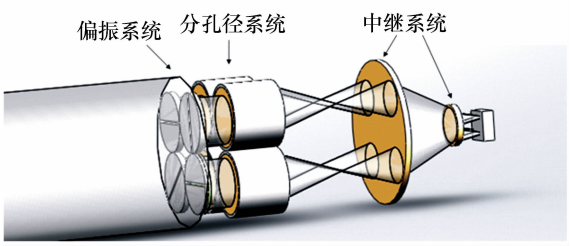


图 1 分孔径红外偏振成像系统结构

Fig. 1 Structure schematic of decentered aperture-divided optical system for infrared polarization imager

而 4 个子系统的偏振通道选择相同材料的线偏振片，单个系统的偏振通道如图 2 所示，设偏振片透光轴与 x 轴方向的夹角为 θ，则焦平面上测得的光强 I_0 为：

$$I_0 = \frac{1}{2}(I + Q\cos 2\theta + I\sin 2\theta). \tag{3}$$

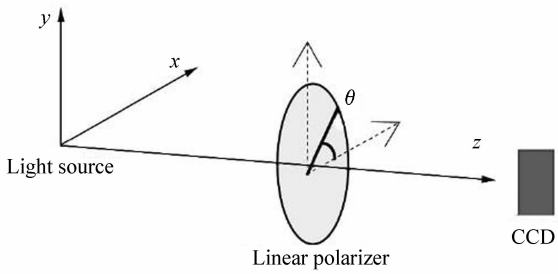


图 2 单个偏振通道

Fig. 2 Single polarization channel

选择 4 个偏振通道的线偏振片方向分别为 0°、90°、45°和 135°，对应的 4 幅线偏振图像光强分别为 I_0、I_{90}、I_{45}、I_{135}，则出射光 Stokes 矢量 I、U、V 可表示为：

$$\begin{cases} I = I_0 + I_{90} \\ Q = I_0 - I_{90} \\ U = I_{45} - I_{135} \end{cases}. \tag{4}$$

偏振片的 Muller 矩阵可表示为：

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{p}} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta\cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta\cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{5}$$

代入式(2)就能够计算出入射光的 Stokes 矢量。

3 设计思路

3.1 设计指标

系统选用的碲镉汞中波红外面阵探测器参数如下：320 pixel×256 pixel，像元尺寸为 30 μm×30 μm。提出光学系统的设计指标：工作波长为 3.7~4.8 μm，焦距 f 为 200 mm，F 数为 4，半视场角为 2°。与可见光成像不同的是，所选用的中波红外制冷型面阵探测器中含有抑制杂散光的冷光阑，为了保证冷光阑匹配效率，光学系统需要采用

二次成像系统,其中通过偏心分孔径成像系统获得 4 幅偏振图像,中继成像系统将 4 幅偏振图像成像到制冷型探测器上。

3.2　分孔径成像系统分析

分孔径成像系统的作用是将光路分割成 4 个通道,将同一物体成 4 幅图像。偏振元件对光学系统的影响可看作平行玻璃板,因此在光学设计中暂未加入偏振元件。

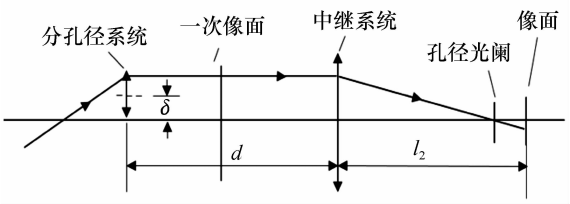


图 3　光学成像系统结构

Fig. 3　Telecentric structure of optical system

光学系统的焦距:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 \times f_2}, \tag{6}$$

理想物像成像公式:

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f}, \tag{7}$$

$$l_2 = l'_1 - d, \tag{8}$$

分孔径成像系统偏心量 δ 与成像偏移量 δ_y:

$$\frac{\delta_y}{l'_2} = \frac{(l_1 - l'_1)}{l_1 \times l_2}\delta, \tag{9}$$

当物体位于无穷远,即 $l_1 = \infty$ 时,

$$\delta_y = \frac{f_2 \times \delta}{f_1 + f_2 - d} = \frac{f}{f_1}\delta. \tag{10}$$

根据式(9)可以看出,当成像偏移量 δ_y 一定时,分孔径系统焦距 f_1 与偏心量 δ 成反比。分孔径成像系统采用偏心离轴结构,为防止 4 个子孔径相互遮挡,偏心量 δ 需大于子孔径直径的 $\sqrt{2}$ 倍[14]。当偏心量过大时不利于像差控制,因此,选取极限情况,$\delta = \sqrt{2}D$,既能缩短系统长度,又能有效控制像差。选择中继成像系统的焦距 f_2 = 150 mm,由式(6)~(10)及保证像中心偏移量为像高一半,计算得出分孔径成像系统的焦距 f_1 = 40 mm。

在中红外波段,光学材料随温度变化明显,直接影响镜片的折射率,进而降低成像质量,所以通常选择在 -20 ~ 60 ℃ 成像良好的光学材料。国内使用较多的红外光学材料是硅、锗等,因此分孔径成像系统采用硅锗硅三片式透射结构,在中波红外能很好地消除色差[15]。如图 4 所示,参数如表 1,本文的设计将系统的入瞳放在透镜之前,实现像方远心结构。

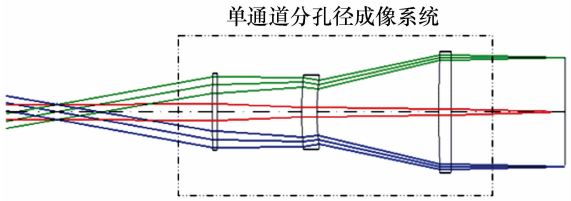


图 4　分孔径成像系统单通道结构图

Fig. 4　Single channel structure of aperture-divided imaging system

表 1　分孔径成像系统单通道参数

Tab. 1　Parameter of single channel in aperture-divided imaging system

序号	半径/mm	厚度/mm	玻璃
1	231.60	3.298 4	SILICON
2	1 066.53	54.34	
3	102.02	9.87	GERMANIUM
4	71.55	78.42	
5	389.06	8.02	SILICON

表 2 列出了分孔径成像系统各类初级像差,计算出结构初级像差均小于 0.01,说明分孔径成像系统结构可行。表 2 中,SA 是球差,TCO 是子午彗差,TAS 是弧矢彗差,SAS 是像散,DST 是畸变。

表 2 分孔径成像系统初级像差

Tab. 2　Primary aberrations of aperture-divided imaging system

SA	TCO	TAS	SAS	DST
-0.001 631	0.002 635	-0.000 091	-0.000 398	-0.007 235

3.3 中继成像系统分析

中继成像系统对一次像面上的物体成像，参照子孔径透镜半径及偏心量作视场角。为在探测器上完整观察到 4 幅偏振图像，要求每幅图片尺寸不超过探测器像面尺寸的 1/4[16]。为使探测器每个像元上得到单个像点，要求 RMS 半径在 30 μm 以内。

由于选用的探测器为中波红外制冷型面阵探测器，中继成像系统出瞳应与探测器冷光阑匹配。为消除杂散光，将冷光阑作为系统的孔径光阑，控制入射到探测器的光束孔径角[17]。设冷屏光阑孔径是 D'，其与探测器的距离是 s，中继成像系统的物方孔径角是 u，出射光边缘孔径角 u'，则：

$$\tan u' = \frac{D'}{2s}. \tag{11}$$

子孔径半径为 R，探测器用 n pixel × n pixel 接收成像面积为 $\pi \times (\sqrt{2}+1)^2 R^2$ 的面，设像元尺寸为 a，得到缩放倍率 β：

$$\beta = \frac{n \times a}{\pi \times (\sqrt{2}+1)^2 D^2}. \tag{12}$$

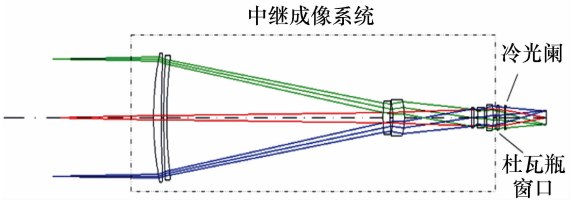


图 5 中继成像系统物方远心光路

Fig. 5 Telecentric optical path of relay imaging system

中继成像系统结构如图 5 所示，参数见表 3。参照分孔径成像系统材料的选取，将硅，锗相结合，使用 7 片透镜结构，冷光阑位于中继成像系统的孔径光阑处，消除杂散光。

表 3 中继成像系统参数

Tab. 3 Parameters of relay imaging system

序号	半径/mm	厚度/mm	玻璃
1	100.99	3.80	SILICON
2	402.03	1.20	
3	339.21	1.70	GERMANIUM
4	145.70	107.56	
5	52.51	3.58	GERMANIUM
6	57.26	1.40	
7	−17.20	5.68	GERMANIUM
8	−23.30	21.48	
9	无限	11.94	
10	162.75	1.20	GERMANIUM
11	−43.54	1.92	
12	−14.81	3.31	GERMANIUM
13	−176.52	1.20	
14	−433.77	3.16	SILICON
15	−21.18	1.86	

4 匹配与像质评价

通过以上分析，分别设计出了红外偏振成像仪的分孔径成像系统和与红外制冷探测器完全匹配的中继成像系统。利用光学软件分析功能，由

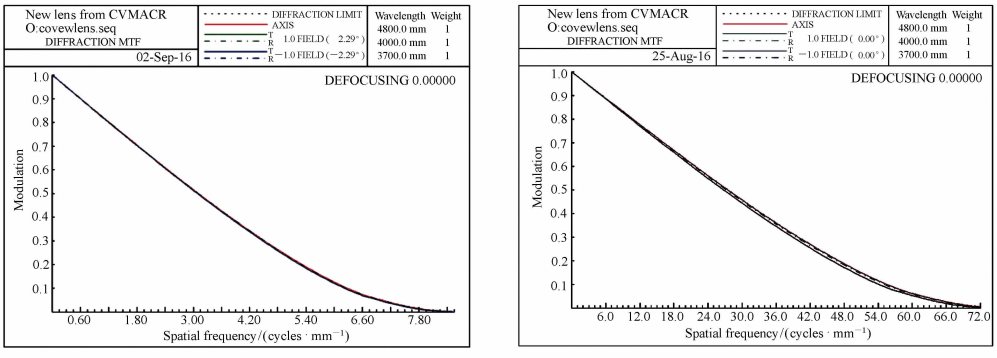


图 6 (a)分孔径成像系统 MTF；(b)中继成像系统 MTF

Fig. 6 (a) MTF of aperture-divided imaing system; (b) MTF of relay imaging system

图 6 不难看出,两个光学系统的传递函数 MTF 都接近衍射极限,成像清晰。为实现两个系统的匹配,在设计时,将分孔径成像系统像方数值孔径与中继成像系统物方数值孔径相匹配,同时,考虑到与红外制冷探测器的连接,系统都采用的远心系统,利用光学软件分析发现,分孔径成像系统的出射光瞳(位于 -0.245×10^{8} mm 处)和中继成像系统的入射光瞳(位于 0.1×10^{11} mm 处)都近似位于无穷远,实现瞳对瞳匹配。完整的光学系统如图 7 所示,4 个子通道具有相同的透镜结构,偏离后置光轴的程度相同,对称排列在后置光轴周围。

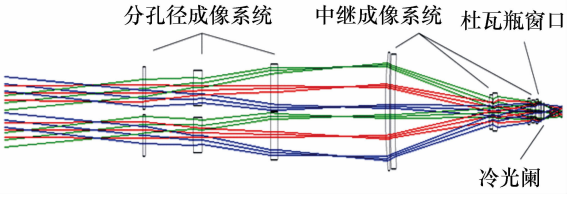
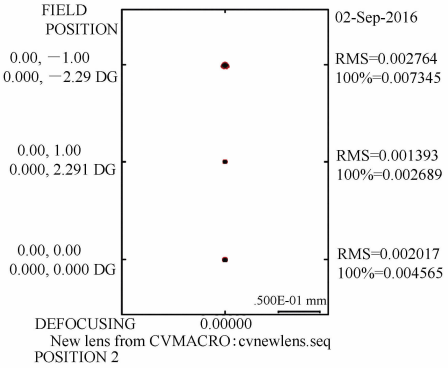


图 7　整体光学系统

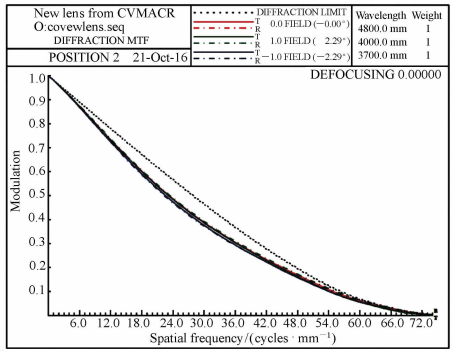
Fig. 7　Integrated optical system

图 8(a)是光学系统的像点图,最大均方根(RMS)直径为 2.764 μm,像元尺寸为 30 μm × 30 μm,说明视场范围内,像点非常集中地成像到每个像元内。整体系统采用硅锗结合降低热像差,选用铝合金作为镜筒材料,热膨胀系数为 23.6×10^{-6}/℃,图 8(b)、8(c)、8(d)为光学系统在 −20 ℃、20 ℃和 60 ℃的传递函数(MTF)曲线,发现在 Nyquist 频率(17 lp/mm)传递函数均超过 0.6,说明整体成像系统在这 3 个温度下成像质量满足设计要求。



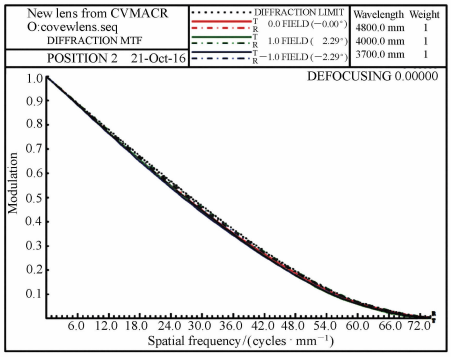
(a) 像点图

(a) Spot diagram



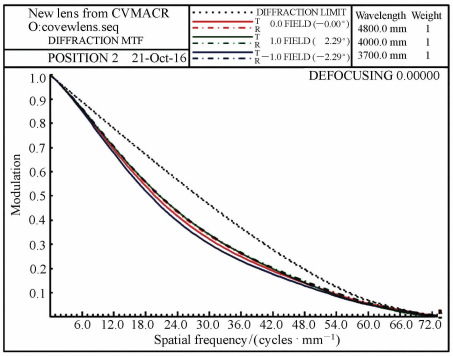
(b) −20 ℃系统整体的传递函数

(b) MTF of the whole system at −20 ℃



(c) 20 ℃系统整体的传递函数

(c) MTF of the whole system at 20 ℃



(d) 60 ℃系统整体的传递函数

(d) MTF of the whole system at 60 ℃

图 8　系统像质评价

Fig. 8　Image quality evaluation

5 结 论

本文对一种新型红外分孔径偏振成像系统进行了分析和设计。该成像仪采用透镜阵列将光学系统分成4个同轴子系统,结构紧凑,容易加工。分别对分孔径成像系统和中继成像系统进行了分析,系统共使用19片透镜(前置3×4片,后置7片),选择硅锗材料,达到红外系统无热化设计,将探测器冷光阑与中继成像系统出瞳重合,并利用远心系统实现光学系统与红外制冷探测器的匹配。设计结果表明,全视场的MTF在奈奎斯特频率17 lp/mm处高于0.7,成像质量满足设计要求。

参考文献:

[1] UNGERH,ZEEVIY Y. Blind separation of a dynamic image sourcefrom superimposed reflection[J]. *SPIE*,2005,5888:588803.

[2] 王骐,梁小雪,魏靖松,等. 采用条纹管激光成像系统的偏振成像实验[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(3): 427-430.
WANG Q,LIANG X X,WEI J S,*et al*.. Experiment oflaser polarization imaging using streak tube laser imagingsystem [J]. *Infrared and Laser Engineering*,2010,39(3):427-430. (in Chinese)

[3] TYO J S, L D, GOLDSTEIN,*et al*.. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. *Applied Optics*,2006,45(22):5453-5469.

[4] SCHECHNERY Y. Polarization-based vision through haze[J]. *Applied Optics*,2003.

[5] HALAJIAN J D,HALLOCK H B. Computerized polarimetric terrain mapping system:US 3864513[P]. 1975-09-11.

[6] 张朝阳,程海峰,陈朝辉,等. 伪装遮障的光学与红外偏振成像[J]. 红外与激光工程,2009,38(3): 423-426.
ZHANG CH Y,CHENG H F,CHEN ZH H,*et al*.. Polarimetric imaging of camouflage screen in visibleand infrared wave band[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2009,38(3):423-426. (in Chinese)

[7] 陈伟力,王霞,金伟其,等. 采用中波红外偏振成像的目标探测实验[J]. 红外与激光工程,2011, 40(1):7-11.
CHEN W L,WANG X,JIN W Q,*et al*.. Experiment of target detection based on medium infrared polarization imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*,2009,40(1):7-11. (in Chinese)

[8] 杨长久,李双, 裘桢炜,等. 同时偏振成像探测系统的偏振图像配准研究[J]. 红外与激光工程,2013,42(1):262-267.
YANG CH J,LI SH,QIU ZH W,*et al*.. Study on image registration of simultaneous imagingpolarization system[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2013,42(1):262-267. (in Chinese)

[9] JONES R C. A new calculus for the treatment of opticalsystems:I. Description and discussion of the calculus[J]. *Opt. Soc. Am*,1941,31:488-493.

[10] 于建冬,梁中翥,梁静秋,等. 成像光谱仪大孔径前置物镜设计研究[J]. 光学学报,2015,35(2):0222002.
YU J D,LIANG ZH ZH,LIANG J Q,*et al*.. Research and design of prefixing objective with large aperture in imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*,2015,35(2):0222002. (in Chinese)

[11] 韩宁. 红外偏振成像技术研究[M]. 南京:南京理工大学,2008.
HAN N. *Study the Image of Infrared Polarization*[M]. Nanjing:Nanjing University of Science and Technology,2008. (in Chinese)

[12] 李淑军,姜会林,朱京平,等. 偏振成像探测技术发展现状及关键技术[J]. 中国光学,2013,6(6): 803-809.
LI SH J,JIANG H L,ZHU J P,*et al*.. Development status and key technologiesof polarization imaging detection[J]. *Chinese Optics*,2013,6(6):803-809. (in Chinese)

[13] 王霞,张明阳,陈振跃,等. 主动偏振成像的系统结构概述[J]. 红外与激光工程,2013,42(8):2244-2251.
WANG X,ZHANG M Y,CHEN ZH Y,*et al*.. Overview on System structure of active polarization imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2013,42(8):2244-2251. (in Chinese)

[14] 贺虎成. 分孔径同时偏振成像光学系统的研究[D]. 苏州:苏州大学,2014.
HE H CH. Study on Optical System of Simultaneous and Complete Polarization Imaging[D]. Suzhou:Soochow University,2014. (in Chinese)

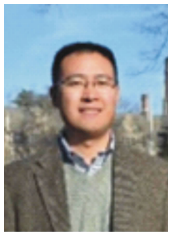
[15] 曲贺盟,张新. 高速切换紧凑型双视场无热化红外光学系统设计[J]. 中国光学,2014,4(9):622-630.
QU H M,ZHANG X. Design of athermalized infrared optical system withhigh-speed switching and compact dual-FOV [J]. *Chinese Optics*,2014,4(9):622-630. (in Chinese)

[16] PEZZANITI J L,CHENAULTD B. A division of aperture MWIR imaging polarimeter[J]. *SPIE*,2005,5888:58880V.

[17] 郜洪云,熊涛,杨长城. 中波红外连续变焦光学系统[J]. 光学 精密工程,2007,7(6):1038-1043.
GAO H Y,XIONG T,YANG CH CH. Middle infrared continuous zoom optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*,2007,7(06):1038-1043. (in Chinese)

作者简介:

王　琪(1991—),女,黑龙江齐齐哈尔人,硕士研究生,主要从事红外偏振成像光学系统设计方面的研究。E-mail:903055249@qq.com



梁中翥(1978—),男,四川广安人,博士,研究员,主要从事基于 MEMS 技术的光学器件及系统方面的研究。E-mail:liangzz@ciomp.ac.cn