文章编号：0253-2239(2009)04-0932-05

共口径中波/短波偏振红外成像光学系统

何红星 赵劲松 潘顺臣
（昆明物理研究所，云南 昆明 650223）

摘要 对中波/短波偏振红外成像光学系统进行了研究，设计了一个新颖的共口径中波/短波偏振红外成像光学系统。该光学系统由全反射式无焦光学系统、分束镜、二级望远系统、偏振组件和红外物镜系统组成，为了约束主反射镜、双面反射镜、分束镜和偏振片的口径，创造性地采用了三次成像光学系统。光波经无焦光学系统后被分束镜分成中波红外波段（3～5 μm）和短波红外波段（1～2.5 μm），然后分别经两个物镜系统会聚到两个探测器上，实现了双波段共口径成像。给出了光学系统的设计结果，像质良好，满足整机使用要求。

关键词 光学系统；红外光学系统；双波段红外光学系统；共口径
中图分类号 TN216 **文献标识码** A **doi**：10.3788/AOS20092904.0932

Common-Aperture Optical System for MWIR/SWIR Polarization Imager

He Hongxing Zhao Jingsong Pan Shunchen
(*Kunming Institute of Physics*, *Kunming*, *Yunnan* 650223 *China*)

Abstract A MWIR/SWIR polarization imaging optical system is presented, and a novel common-aperture optical system for MWIR/SWIR polarization imager is designed. The MWIR optical system is composed by an all-reflective afocal system, a beamsplitter, a secondary telescope, an infrared polarizer, and an infrared objective. For controlling the apertures of the first mirror, the two face reflective mirror, the beamsplitter and the infrared polarizer, a triple imaging optical system is designed. By the beamsplitter the light is divided into the MWIR (3～5 μm) waveband and the SWIR (1～2.5 μm) waveband, they are converged on two detectors respectively by two objectives, the dual wave-band optical system realized common aperture. The imaging quality is perfect, it can be satisfied to the imager, and the design result is provided.

Key words optical system; infrared optical system; dual wave-band infrared optical system; common aperture

1 引 言

依据光波的电磁理论，光波包含的信息主要有：振幅（对应于光强）、波长（频率）、相位、偏振态。传统的红外成像属于光强成像，探测的是光波的光强，即振幅信息。偏振成像在光强的基础上附加了偏振信息，是一种新的成像技术。无论偏振成像技术还是多波段、多光谱成像技术，都可以提高整机系统的识别概率，提高整机系统的作用距离，增强整机系统对自然环境和气候条件的适应性，增强整机系统对伪装目标的识别概率[1~6]。对于伪装的目标，其与自然背景有不同的偏振度，利用偏振度对目标成像就可以发现隐藏目标，而强度成像却不能发现隐藏目标，因此利用偏振成像可以识别伪装目标[7]。自然界的物体如树木、泥土和表面粗糙的物体对偏振光的消偏作用比人造光滑物体更大，因此偏振成像提供了识别杂乱自然背景中人造目标的手段[8]。

中波/短波偏振红外成像光学系统工作在两个红外波段，光学系统复杂，光学系统采用折反射式，光路折转次数多，设计难度大。本文将详细讨论中波/短波偏振红外成像光学系统的设计。

收稿日期：2008-08-29；**收到修改稿日期**：2008-10-17
基金项目：总装备部重点基金项目（6140527）资助课题。
作者简介：何红星（1977—），男，博士研究生，主要从事红外光学技术与光电系统的研究。E-mail：hxhe2000@163.com
导师简介：潘顺臣（1949—），男，研究员，博士生导师，主要从事光学技术与光电仪器等方面的研究。

2　光学系统方案

2.1　光学系统主要技术指标

根据中波/短波偏振红外成像整机的要求，光学系统的主要技术指标如下：1）双工作波段，中波红外波段 3～5 μm，短波红外波段 1～2.5 μm；2）焦距，$f_{\mathrm{eff}}=240$ mm；3）F 数，$F/\#2$；4）探测器，中波红外 320×256 FPA 探测器，像元尺寸 30 μm×30 μm；短波红外 320×256 FPA 探测器，像元尺寸 30 μm×30 μm。

2.2　光学系统方案

光学系统基本原理如图 1 所示。整个光学系统包括中波红外系统和短波红外系统两支光路，两光路共用无焦系统作为前端望远接收部分，然后通过分束镜分成中波红外波段（3～5 μm）和短波红外波段（1～2.5 μm），两波段采用折射式系统，折射式系统可以是一次成像系统，也可以是二次成像系统。中波红外波段和短波红外波段共用无焦系统，做到了两个波段共口径，克服了折射式系统需要镀宽波段增透膜的难题，在无焦系统的出射光路中放置分束镜，将光波按不同光谱波段分成两束，其中中波红外波段的光波经中波二级望远系统、中波红外偏振元件、中波红外物镜系统聚焦于中波红外探测器上，短波红外波段的光波经短波二级望远系统、短波红外偏振元件、短波红外物镜系统聚焦于短波红外探测器上，实现共口径的双波段偏振成像系统。由于分束镜和偏振片的口径小，需要约束无焦系统出射光束的口径，同时无焦系统的主镜不能过大，需要约束主镜的口径。

2.3　中波红外系统设计

为了约束主镜、分束镜和偏振片的口径，中波红外波段光学系统采用三次成像系统，由前置无焦系统（ZH 系统）[9]、二级望远系统、偏振组件和物镜系统等组成，如图 1 所示。

2.3.1　ZH 系统

如图 1 所示，无焦系统由两块相对放置的抛物面反射镜和一块 45°放置的双向平面反射镜共同组成，两抛物面反射镜共焦点，双向平面反射镜的中心有一通孔，该通孔中心位于两抛物面反射镜的公共焦点处，把这种共轴全反射式无焦光学系统称为 ZH 系统[8]。系统结构参数：1）系统的角放大率：$MP_{\mathrm{K}}=-F_{\mathrm{O}}/F_{\mathrm{E}}=D_{\mathrm{A}}/D_{\mathrm{B}}$；2）系统光学长度：$L=F_{\mathrm{O}}+F_{\mathrm{E}}$；3）系统的垂轴放大率：$m_{\mathrm{K}}=1/MP_{\mathrm{K}}=-F_{\mathrm{E}}/F_{\mathrm{O}}=D_{\mathrm{B}}/D_{\mathrm{A}}$。其中 F_{O} 为主镜的焦距，F_{E} 为次镜的焦距，D_{A} 为主镜的通光口径，D_{B} 为次镜的通光口径。

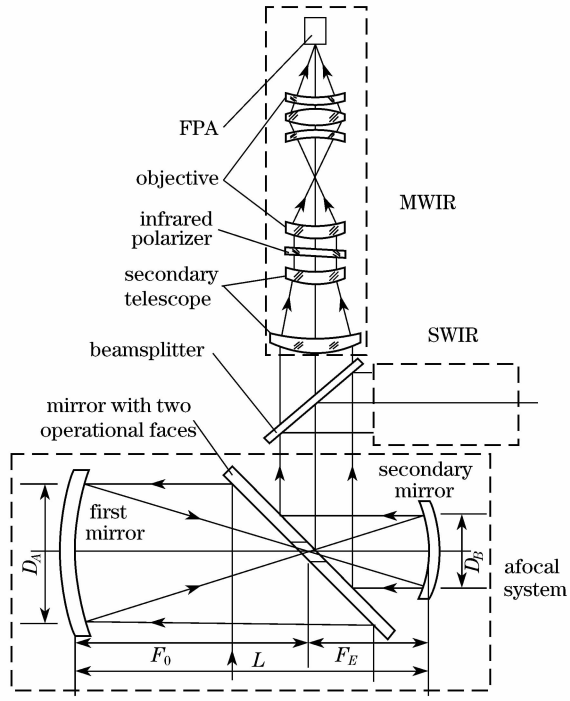


图 1　中波红外/短波红外成像系统

Fig. 1　MWIR/SWIR imaging optical system

目前，由于分束镜（分离中波红外波段和短波红外波段辐射）的口径小（$\phi\leqslant 50$ mm），需要约束 ZH 系统出射光束的直径。为了约束 ZH 系统出射光束的直径，即减小 $m_{\mathrm{K}}=1/MP_{\mathrm{K}}=-F_{\mathrm{E}}/F_{\mathrm{O}}=D_{\mathrm{B}}/D_{\mathrm{A}}$ 中 D_{B} 的尺寸，则需要减小 ZH 系统的垂轴放大率 m_{K}，即增加 ZH 系统的角放大率 MP_{K}，但不能无限制的减小 m_{K}，因为减小 ZH 系统的垂轴放大率将带来 ZH 系统长度尺寸 L 增大，系统遮拦比增大等问题。根据计算和优化，ZH 系统焦比 $\beta=-F_{\mathrm{O}}/F_{\mathrm{e}}=4:1$ 能满足系统的要求。

2.3.2　二级望远系统

由于偏振组件的口径很小（$\phi\leqslant 40$ mm），因此 ZH 系统出射光束的直径需要进一步约束，方法有两种：其一，减小 ZH 系统的垂轴放大率，即增加 ZH 系统的角放大率，但带来 ZH 系统长度尺寸 L 增大，系统遮拦比增大；其二，在 ZH 系统后增加一级望远系统来约束系统口径，如伽利略望远系统（如图 2 所示），可以做到 ZH 系统遮拦比不变，同时缩小后续物镜系统的横向尺寸和纵向尺寸。结构参数：1）系统角放大率：$MP_{\mathrm{G}}=-f_{\mathrm{O}}/f_{\mathrm{e}}=d_{\mathrm{A}}/d_{\mathrm{B}}$；2）系统光学长度：$t=f_{\mathrm{O}}+f_{\mathrm{e}}$；3）系统垂轴放大率：$m_{\mathrm{G}}=1/MP_{\mathrm{G}}=-f_{\mathrm{e}}/f_{\mathrm{O}}=d_{\mathrm{B}}/d_{\mathrm{A}}$。经计算，中波红外波段，$MP_{\mathrm{G}}=2$；短波红外波段，$MP_{\mathrm{G}}=1.6$。其中 f_{O} 为第一透镜的焦距，f_{e} 为第二透镜的焦距，d_{A} 第一

透镜的通光口径，d_B 第二透镜的通光口径。

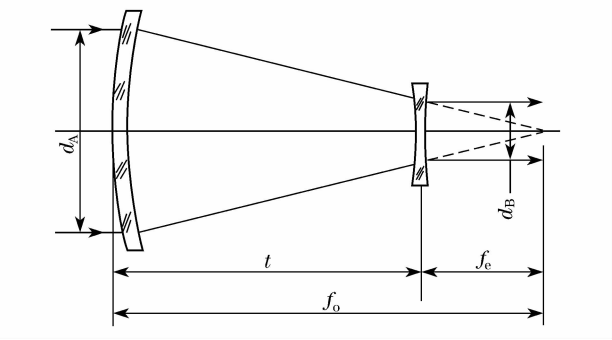


图 2 伽利略望远系统

Fig. 2 Galilean-type telescope

2.3.3 物镜系统

为使系统的出瞳与探测器的冷屏匹配，经理论计算和仿真设计，物镜系统采用二次成像的方式[10,11]（如图 3 所示），结构参数：1）系统的焦距 F；2）系统的后焦距 $B=(1-D\phi_a)F=L_1-D$；3）出瞳距离 $S=B-\Delta=D/(D\phi_b-1)$；4）物镜 a 的光焦度：$\phi_a=(F-B)/DF$；5）中继透镜 b 的光焦度：$\phi_b=(L_1-F)/DB$。其中 B 为中继透镜到焦平面的距离，D 为物镜到中继透镜的距离，Δ 为冷屏到焦平面的距离，L_1 为系统的光学总长。

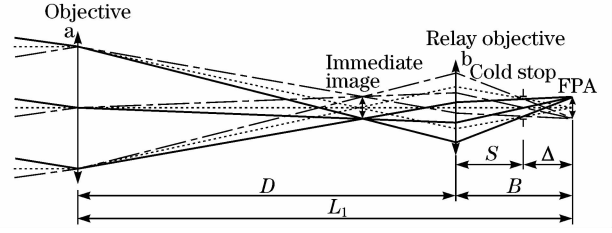


图 3 二次成像物镜系统

Fig. 3 Reimaging objective system

2.4 偏振组件

偏振组件是实现偏振信息提取的核心部件，将其置于二级望远系统和物镜系统之间，通过旋转偏振组件：（如图 4 和图 5 所示）实现偏振滤波，提取偏振信息，后端电路组件根据光学偏振处理的结果进行图像处理。

2.5 短波红外波段系统设计

短波红外波段光学系统的设计与中波红外波段光学系统类似，两波段共用 ZH 系统，不同部分是后端物镜系统。短波红外探测器无冷屏，人为在探测器前面加一冷屏，限制成像光束的口径。短波红外光学系统无须与探测器冷屏匹配，因此，短波红外物镜系统可采用一次成像方式，采用一次成像能够缩短系统的长度，减小系统体积和重量。短波红外物镜系统采用摄远镜头，可使系统的总长度小于系统的焦距，能缩短仪器的外形尺寸，增加视场，校正球差、彗差、场曲和像散[12~15]。

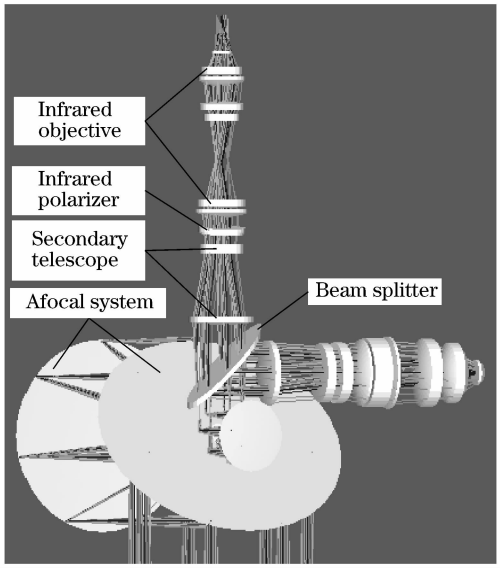


图 4 中波/短波红外偏振成像光学系统

Fig. 4 MWIR/SWIR polarization imaging optical system

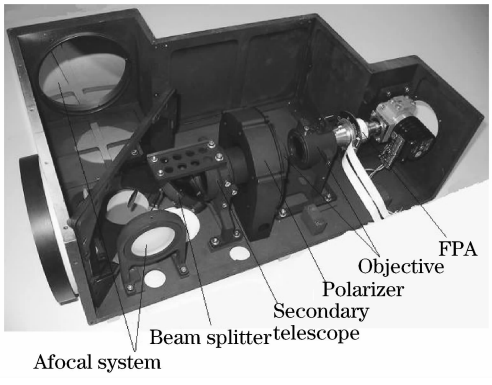


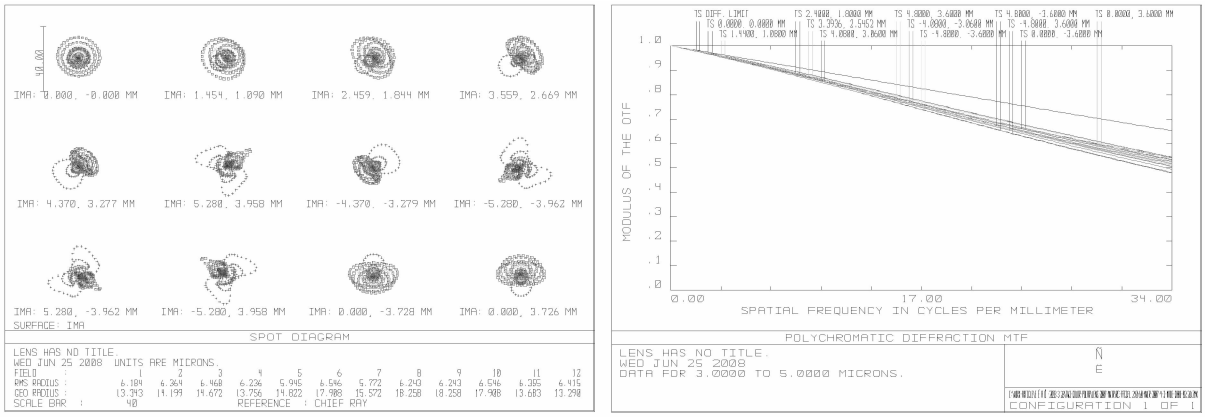
图 5 中波/短波红外偏振成像整机图

Fig. 5 Protype of the MWIR/SWIR polarization imager

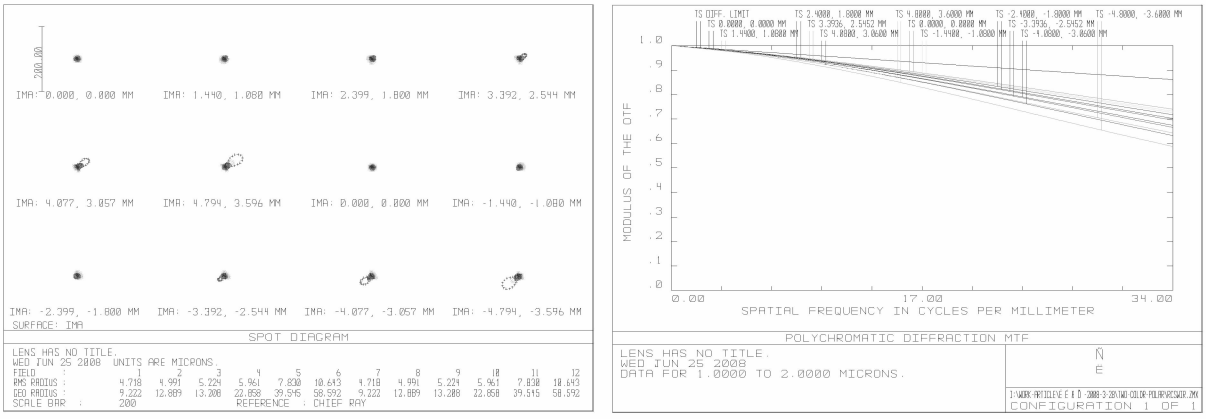
3 优化设计结果及评价

依据上述方案进行光学系统的设计，分配各级系统的光焦度，从初级象差理论出发计算各级系统的初始结构参数；利用 Zemax 和 CODE-V 软件进行优化设计，校正各类象差，平衡初级和高级象差得到满足技术要求的中波/短波红外双波段系统，设计结果如图 4 所示，图 5 为装配完毕后的中波/短波红外整机外形图，ZH 系统主镜与次镜的焦比为 $\beta=F_O:F_E=4:1$，二级望远系统的角放大率 $\Gamma'=2/1=2$，系统望远部分的总角放大率 $\Gamma=8/1=8$，后续物镜系统焦距 $f'_{relay}=30$ mm。中波红外系统的点列图及传递函数如图 6(a)所示，均方根弥散斑半

径最大值为 6.55 μm，几何弥散斑半径最大值为 18.3 μm，满足成像要求，在探测器截止频率处系统传递函数值为 0.5，满足要求；短波红外系统的点列图及传递函数如图 6(b)所示，均方根弥散斑半径最大值为 18.6 μm，几何弥散斑半径最大值为 58.6 μm，满足成像要求，在探测器截止频率处系统传递函数值为 0.6，满足使用要求。



(a) MWIR



(b) SWIR

图 6　MWIR/SWIR 偏振成像光学系统点列图及 MTF 评价图

Fig. 6　Spot diagram and MTF corresponding to MWIR and SWIR polarization imaging optical arms

4　结　　论

该中波/短波偏振红外成像光学系统是一个共口径双波段成像光学系统。为了实现了双波段共口径成像，光学系统采用一个新型的共轴全反射无焦系统。为了约束主反射镜、双面反射镜、分束镜和偏振光学元件的横向尺寸，光学系统采用三次成像，其中景物是三次成像，光瞳是二次成像，入瞳位于主反射镜上，约束了主反射镜和双面反射镜的口径，入瞳的一次像在分束镜和次镜之间，约束了分束镜口径，同时也约束了偏振片口径。系统结构紧凑，实现了模块化，便于集成。该光学系统除用于中波/短波偏振红外成像系统外，也可用于多波段/多光谱成像系统，或机载搜索跟踪系统。光学系统设计结果性能好，满足整机使用要求。目前已完成设计、加工，装配调试技术将在随后的论文中进行专门阐述。

参　考　文　献

1 R. Walracen. Polarization imagery[J]. *Opt. Eng.*, 1981, **20**(1): 14～18

2 James D. Howe. Two-color infrared full-stokes imaging polarimeter development[J], *IEEE Aerospace Conf.*, 1999, (3): 6～13

3 O. Schreer, Th. hierl, J. Fries *et al.*. Helicopter-borne dual-band dual-FPA system[C]. *SPIE*, 2003, **5074**: 637～646

4 Michael J. Duggin. Information enhanceent metrics and data fusion in spectral and polarimetric images of natural scenes[C]. *SPIE*, 2007, **6682**: 6682A1～6682A9

5 Michael W. Jones, Christopher M. Persons. Performance predictions for micro-polarizer array imaging polarimeters [C]. *SPIE*, 2007, **6682**: 668208-1～668208-11

6 Wendy Hubbard, Gary Bishop, Trevor Gowen *et al.*. Multispectral-polarimetric sensing for detection of difficult targets [C]. *SPIE*, 2008, **7113**: 71130L-1～71130L-7

7 Zhang Xuguo, Jiang Yuesong, Lu Xiaomei. Adjustment of optical element sand error analysis for laser remote sensing polarization imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1191～1196
张绪国，江月松，路小梅. 激光遥感偏振成像系统光学元件调整及误差分析[J]. 光学学报，2008，**28**(6)：1191～1196
8 Lu Xiaomei, Jiang Yuesong, Rao Wenhui. The polarization analysis of t he telescope used for the lidar polarization active imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10) :1771～1774
路小梅，江月松，饶文辉. 激光雷达偏振成像遥感的望远镜系统偏振分析[J]. 光学学报，2007，**27**(10)：1771～1774
9 *Zhao Jinsong*, *Cai Yi*, *Pan Shunchen* et al.. *A Novel All-Reflective Optical System with the Minimal Central Obstacale Ratio and its Applications*[P]. National Defence Patent, 2007, 200610119957.3
赵劲松，蔡 毅，潘顺臣 等. 一种中心遮挡比最小的全反射式光学系统及其应用[P]. 国防专利，2007，200610119957.3
10 Warren J. Smith. *Practical optical system layout*[M]. New York: McGraw-Hill, 2005, 145～151
11 K H Lee. First-order optics computation for re-imaging IR optical systems[C]. *SPIE*, 2003, **5076**: 123～129
12 Remeo L. Mercado. Lens doublet color-corrected for visible and near-infrared wavelengths[P]. *USP*, 1987, 4, 712, 886
13 David G. Norrie. Infrared optical system[P]. *USP*, 1986, 4, 006, 265
14 Gary E. Wiese. Refractive multispectral objective lens system and methods of selecting optical materials therefore[P]. *USP*, 2005, **6**, 950, 243
15 Shiyu Zhang. Wide band infrared camera lens systems[P]. *USP*, 1999, **5**, 940, 224

《中国激光》“激光制造”专题征稿启事

激光制造技术是国家重点支持和推动的一项高新技术，近年来在涉及国家安全、国防建设、高新技术产业化和科技前沿等领域已取得多项重大研究成果。《中国激光》计划于 2009 年 12 月正刊上推出“激光制造”专题栏目，现特向国内外广大专家学者征集“激光制造”方面原创性的研究论文和综述，旨在集中反映该领域最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括：

- 激光强化与材料制备
- 激光直接制造与微纳加工
- 激光器与激光加工系统
- 激光冲击与强化
- 激光焊接与切割
- 激光烧结与沉积
- 激光新应用与过程模拟
- 其他

截稿日期：2009 年 9 月 30 日

投稿方式以及格式：通过网上投稿系统(http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm)直接上传稿件(主题标明“激光制造”投稿)，也可直接将稿件电子版发至邮箱：zhgjg@mail.shcnc.ac.cn(主题标明“激光制造”投稿)，详情请参见中国光学期刊网：www.opticsjournal.net。本专题投稿文体不限，中英文皆可，其电子版请使用 MS-word 格式，有任何问题请发邮件至 zhgjg@mail.shcnc.ac.cn 询问。

《中国激光》编辑部