

# 长波红外与激光共型光学系统优化设计

梅 超<sup>1</sup> 曹剑中<sup>1</sup> 杨洪涛<sup>1,2</sup> 范哲源<sup>1,2</sup> 梁元庆<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所,陕西 西安 710119

<sup>2</sup>中国科学院大学,北京 100049

**摘要** 为了实现小型化设备的精密测量,提出了一种共孔径长波红外/激光双模测量方案。根据实际需求完成了光学系统设计,系统中的长波红外成像,激光接收、发射光学系统采用了共型设计,长波红外成像,激光接收系统采用了共用光阑和主光路的结构形式,压缩了整个光学系统体积。设计出的整个光学系统体积为 450 mm×164 mm×164 mm,符合小型化、轻量化要求。通过在光学设计软件中的分析可知,该系统中的长波红外光学系统在 30 lp/mm 处调制传递函数大于 0.23,激光发射端波相差小于 1/4 波长,激光接收端弥散斑半径小于 10 μm,满足实际工程设计要求。

**关键词** 光学设计;精密测量;长波红外;激光

**中图分类号** TH74 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.s122002

## Optimization Design of Long Wave Infrared Rays and Laser Optical System with Conformance Structure

Mei Chao<sup>1</sup> Cao Jianzhong<sup>1</sup> Yang Hongtao<sup>1,2</sup> Guo Zheyuan<sup>1</sup> Liang Yuanqing<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xian, Shaanxi 710119, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In order to improve the precision of small measure equipment, the manuscript presents a structure of common aperture, long wave infrared rays/laser dual-mode measure equipment. Then an optical system is designed to match the system's needs. The long wavelength infrared imaging system and the laser receiver, laser emission system use the same protect window, the far infrared imaging system and the laser receiver use the same aperture and reflector, in this way the size of optical system is reduced. The volume of the whole optical system is 450 mm×164 mm×164 mm, coincident with the requirement of small and light. At last, analysis the performances of each optical systems by the software, the modulation transfer function of the far infrared imaging system is above 0.23 at 30 lp/mm, the optical path difference of the laser receiver is smaller than 1/4 wavelength, the spot diagram of laser emission system is smaller than 10 μm, all of them can match the project requirement.

**Key words** optical design; measure equipment; long wavelength infrared; laser

**OCIS codes** 220.2740; 110.3080; 140.3460

## 1 引 言

由于红外成像具有被动成像、抗干扰能力强、可以全天候、恶劣天气条件下正常工作等特点,被广泛应用于各类光学成像测量系统中。但红外被动成像容易受到红外假目标以及其他红外干扰手段影响,并且在测量运动目标的过程中,随着测量系统接近目标,会出现近场大目标效应,产生目标角噪声,影响测量精度,使它在实际应用中受到限制<sup>[1]</sup>。

相对于红外成像测量,激光测量是一种主动测量方式。主动激光雷达是基于目标的反射率特性对目标进行探测的,物体的反射率差异是不易受环境变化的影响,并可以获得与环境无关的目标速度、距离强度等信息,具有很高的目标识别精度。此外激光具有很高的单色性和方向性,具有光束发散角小、能量集中等特

**收稿日期:** 2015-02-15; **收到修改稿日期:** 2015-03-15

**作者简介:** 梅 超(1987—),男,博士,助理研究员,主要从事光电成像测量方面的研究。E-mail: s09026@opt.cn

点,可以实现更高的跟踪精度,在动目标近距离测量中具有无法比拟的优势。但其搜索范围小,同时受到功率限制,作用距离短<sup>[2-3]</sup>。

所以,目前很多高速非合作运动目标的测量均采用红外、激光双模测量方式。2001年美国成功研制了一种红外成像/激光雷达双模精密跟踪测量设备,在实际应用中大幅提高了跟踪测量精度<sup>[4]</sup>。2004年,德国也成功研制了一种小型双模精密跟踪测量设备,所采用的也是红外、激光双模工作方式<sup>[5]</sup>。在国内,2005年时,哈尔滨工业大学的遆小光等<sup>[6-10]</sup>已经开始了红外、激光双模小型化测量设备的研究,提出了多种结构形式的中波红外、激光双模精密测量设备实现方案,同时该技术也引起了长春光机所等多个高校以及科研院所等多家单位的兴趣和重视。

考虑到中波红外成像系统造价昂贵的问题,本文提出了一种长波红外非制冷成像测量与激光主动测量结合的精密测量方案,在此基础上计算了一种共型长波红外成像、激光发射、接收光学系统基本结构尺寸,并完成了相关设计,实现了小型化、轻量化,在该紧密结构的前提下长波红外系统  $F$  数达到了 1.25。最后通过仿真分析可知该系统基本满足实际使用要求,为实际产品的研制提供了设计依据。

## 2 主要参数及结构的选取

目前国内外在设计红外、激光双模精密跟踪测量系统时主要采用中波红外和激光组合,激光波长主要选取 1064~1600 nm。考虑到中波红外制冷探测器的价格是长波红外非制冷探测器的 10 倍,而且大部分情况下设备不可回收,并且随着光电子技术的发展长波红外探测器性能不断提升,所以尝试设计长波红外、激光双模导航系统。为了保证实验过程中的安全,选取激光波长大于人眼安全波段(大于 1450 nm),即 1550 nm。

考虑到系统结构的紧凑型和稳定性,长波红外、激光双模精密测量系统总体结构规划如图 1 所示,主要包括 3 个部分:长波红外成像系统、激光发射光学系统和激光接收光学系统。长波红外光学成像系统和激光接收系统需要较大口径,并要共用主光路,所以均采用 R-C 折反光学系统结构。激光发射系统口径较小所以采用透射式结构。长波红外光学系统用于对整个目标识别,所以具有较大视场,其投影镜组体积较大,位于半透半反射透镜右侧。激光接收系统视场角较小,设计难度小,其投影镜组体积小,位于主镜后方。激光发射端体积较小,且容易设计,为了压缩整个系统体积,将其安放在次镜左侧,并保持与次镜 100 mm 左右距离,用于安装激光器以及其他相关器件。考虑到整个系统位于整个设备前端,所以需要对整个光学系统进行保护,既透长波红外又耐高温,耐冲击的材料较少,所以选取压制 ZnS 作为保护窗<sup>[11]</sup>。

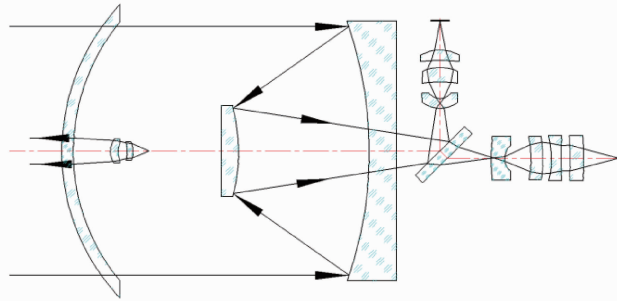


图 1 光学系统总结构图

Fig. 1 Whole structure diagram of the optical system

## 3 光学系统参数计算

为了达到使用要求,考虑到长波探测器性能与中波制冷型探测器的差距,提出光学系统相关设计参数如表 1 所示。激光接收端在长波红外光学系统主结构的基础上实现,结合选用的雪崩光电二极管(APD)参数,提出激光接收光学系统设计参数如表 2 所示。为了方便激光发射端设计,采用逆向设计的方法,提出光学系统设计参数如表 3 所示。

表 1 长波红外系统参数

Table 1 Parameters of long wavelength infrared system

Parameters	Value
Diameter/mm	160
Focus length/mm	-200
Field of view/(°)	3
Wavelength/ $\mu\text{m}$	8~12

表 2 激光接收系统参数

Table 2 Parameters of laser receiving system

Parameters	Value
Diameter/mm	160
Focus length/mm	-200
Field of view/(°)	0.5
Wavelength/ $\mu\text{m}$	1.55

表 3 激光发射系统参数

Table 3 Parameters of laser emission system

Parameters	Value
Diameter/mm	8
Focus length/mm	20
Field of view/(°)	0.28
Wavelength/ $\mu\text{m}$	1.55

在此基础上,结合整系统结构先对反射光学系统基本参数进行计算。首先确定前端反射系统初始结构,确定主镜的相对口径等其他相关参数。考虑到加工能力和实际设计困难望远镜系统大多采取  $1/3\sim 1/2$  的相对口径,考虑到该设计的相对口径较大,所以主镜选取的相对口径也比较大,为  $1/1.5$ ,但在可加工范围内。为了在主镜后方实现分光,分光镜面积越小越好,所以取主镜后方为一次像面,在一次像面附近进行分光,确定反射系统的像面伸出量  $\Delta$  为 60 mm。此时主镜焦距  $f'_1$  可以通过其口径和相对口径的取值计算出来,为  $-240$  mm,为了减小投影镜设计压力,以及遮拦比,主光路放大率  $\beta$  取  $-2.5$ 。再通过下面的(1)~(5)式计算光学系统的其他参数,各参数定义如图 2 所示,其中  $R_1$  和  $R_2$  分别为主次镜的曲率半径, $k_1$  和  $k_2$  分别为主次镜的二次曲面系数:

$$l_2 = \frac{-f'_1 + \Delta}{\beta - 1}, \tag{1}$$

$$R_2 = \frac{l_2 \beta R_1}{f'_1(\beta + 1)}, \tag{2}$$

$$d = f'_1 \left(1 - \frac{l_2}{f'_1}\right), \tag{3}$$

$$k_1 = -1 - \frac{2l_2}{(f'_1 - l_2)\beta^2}, \tag{4}$$

$$k_2 = \frac{2f'_1}{f'_1 - l_2} + \frac{(1 + \beta)(1 - \beta)^2}{(1 + \beta)^3}. \tag{5}$$

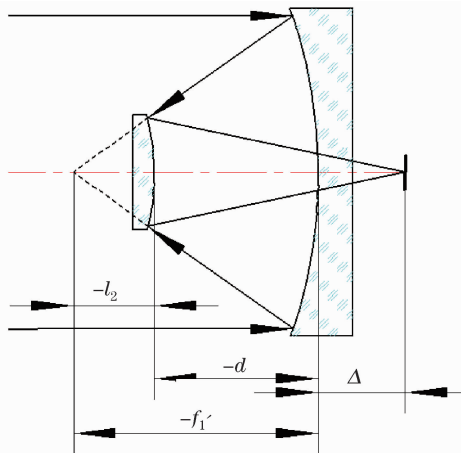


图 2 反射镜结构示意图

Fig. 2 Structure of reflect mirror

其次计算投影镜组相关参数,将反射系统看做一个整体,将投影镜组看做一个整体就可得

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'_{Ge}}, \quad (6)$$

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'_{Ge}}, \quad (7)$$

$$\phi'_s = \phi_s \frac{s'}{s} = D \frac{s_0}{-d} \frac{s'}{s}, \quad (8)$$

$$f'_s = \frac{r_1}{2} \frac{l'_0}{l_0} \frac{l'}{l}, \quad (9)$$

$$l = \frac{B(1-A)(s_0 - l'_0)}{A-B}, \quad (10)$$

式中,  $f'_{Ge}$  是投影镜组的焦距,  $A = \frac{2Dl'_1}{r_1 l}$ ,  $B = -\frac{d\phi'_s}{s_0 D}$ 。

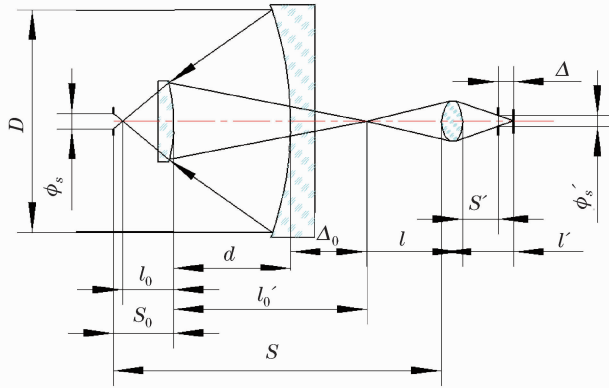


图 3 与投影镜组参数计算有关的参数示意图

Fig. 3 Parameters relative to the projection lens system

假设投影镜组的入瞳  $\phi_s$  为 10mm, 求解投影镜组到反射镜组焦点的距离为负值, 且不等于无穷, 说明该设计是可行性的。

#### 4 设计结果及其分析

在上述计算结果的基础上利用软件进行设计和分析, 其中长波红外成像光学系统的设计和分析结果如图 4 所示。其中图 4(a) 为其设计结果, 该系统焦距 -200 mm, 全视场  $3^\circ$ , 口径为 162 mm, 总长度 450 mm, 次镜到保护玻璃距离 145 mm, 预期结果基本相符。图 4(b) 为其调制传递函数, 基本达到衍射极限, 在 30 lp/mm 处调制传递函数大于 0.23。

激光接收光学系统设计和分析结果如图 5 所示, 其中图 5(a) 为其设计结果, 图 5(b) 为点列图, 由图可知该设计与预期结果基本相符, 焦距 -200 mm, 视场  $0.5^\circ$ , 口径 162 mm, 像面正好位于主镜边缘以内, 可以直接安装在镜筒上。弥散斑半径小于  $10 \mu\text{m}$ , 可以满足实际使用要求。

激光发射光学系统设计和分析结果如图 6 所示, 其中图 6(a) 为其设计结果, 图 6(b) 为波相差曲线, 由图可知该设计与预期结果基本相符, 焦距 20 mm, 视场  $0.28^\circ$ , 总长 40 mm, 保留了像面到次镜间距离 105 mm。波相差小于 0.13 个波长, 可以满足实际使用要求。

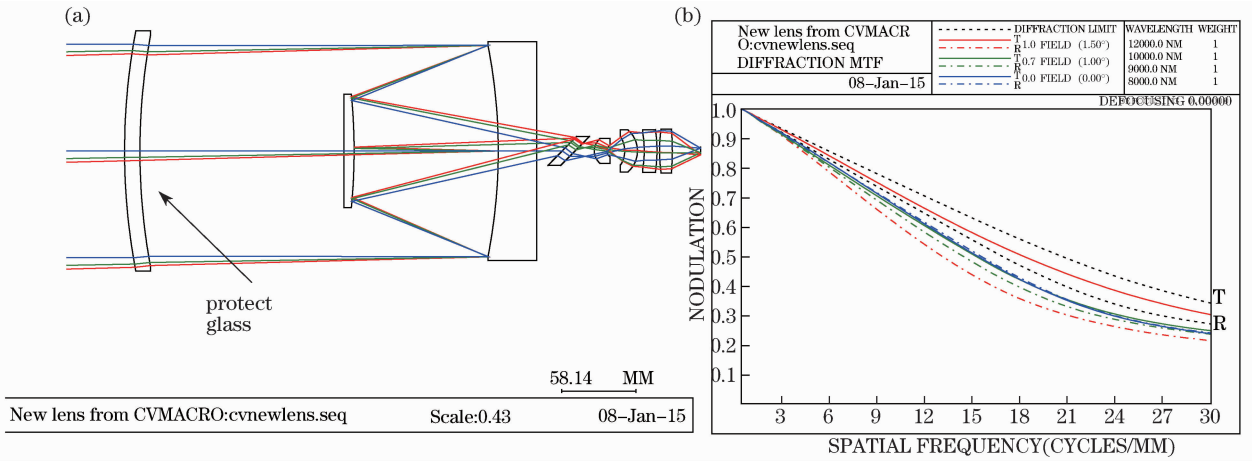


图 4 长波红外成像系统设计和分析结果。(a)系统设计结果;(b)系统调制传递函数  
Fig. 4 Design and analysis result of long wavelength infrared system. (a) Design of the system;  
(b) modulation transfer function

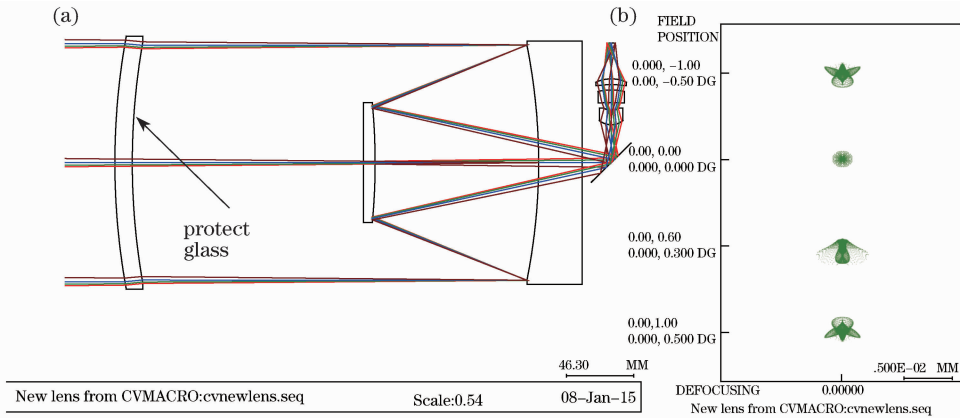


图 5 激光接收系统设计结果。(a)系统设计结果;(b)系统点列图  
Fig. 5 Design result of laser receiving system. (a) Design of the system; (b) spot diagram of the system

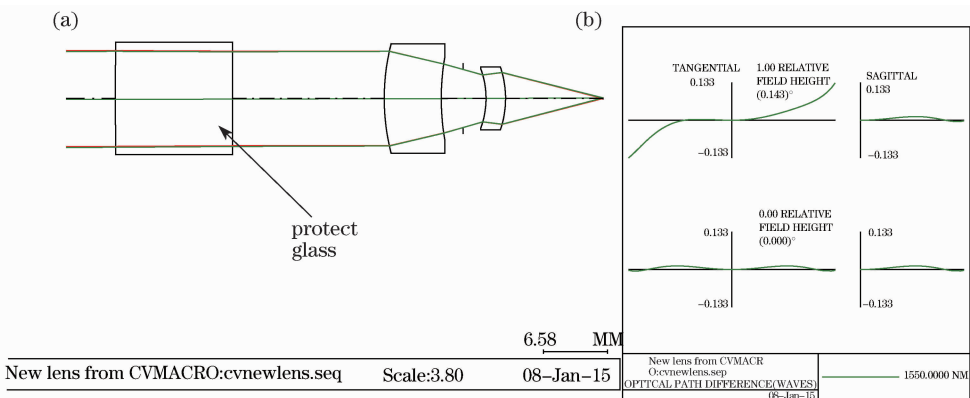


图 6 激光发射系统设计结果。(a)系统设计结果;(b)系统波相差  
Fig. 6 Design result of laser emission system. (a) Design of the system;  
(b) optical path difference of the system

综上所述,设计结果与图 1 基本相符,整个光学系统总体积小于  $450 \text{ mm} \times 164 \text{ mm} \times 164 \text{ mm}$ 。经分析,设计结果基本满足使用要求。上述设计结果中长波红外成像系统仅使用了 Ge 和 ZnS 两种材料,投影镜组使用了三个非球面,激光接收端仅使用了 Si 和 ZnS 两种材料,投影镜组使用了两个非球面,激光发射端仅使用了 Si 和 ZnS 两种材料,没有使用非球面。

## 5 结 论

为了减小红外、激光双模精密测量设备成本,提出了一种长波红外、激光双模测量的工作方式,通过分析优化设计最终实现了基本光学结构设计,通过软件分析可知在成像和激光接收与发射方面基本可以实现,而长波红外成像系统设计难度最大,主要原因是其较大的相对孔径和视场影响了系统的遮拦比。但随着光电子技术的发展,长波非制冷红外探测器性能的提升,该系统的相对孔径需求就会减小,那么其设计难度、系统体积均会减小,长波红外、激光双模精密测量设备就会因为其性能的提升和廉价而取代一般的中波、激光双模精密测量设备,所以该研究具有一定的实用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Liu Longhe. Technology of Multi-Model Composite Homing Guidance[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998.  
刘隆和. 多模复合寻的制导技术[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- 2 Chen Xiaoqing, Ma Junguo, Fu Qiang, *et al.*. Range anomalies suppression method of coherent laser radar range image[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1):181-185.  
陈晓清, 马君国, 付强, 等. 相干激光雷达距离像距离反常抑制方法[J]. 中国激光, 2010, 37(1):181-185.
- 3 Liu Xingtang. Technology of Precision Guidance, Control and Simulation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.  
刘兴堂. 精确制导、控制与仿真技术[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- 4 J Barenz, R Baumann, H D Tholl. Eyesafe imaging LADAR /infrared seeker technologies [J]. SPIE,2005,5791:51-60.
- 5 J C Kirsch, W R Lindberg, D C Harris. Tri-mode seeker dome considerations [J]. SPIE,2005,5786:33-40.
- 6 Ti Xiaoguang, Yao Yu, Zhou Fengqi. Common aperture IR/laser dual-mode imaging system[J]. Infrared and laser engineering, 2005, 34(5): 577-578.  
童小光, 姚郁, 周凤岐. 共孔径红外/激光双模成像系统研究[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(5): 577-578.
- 7 Wang Chao, Zhang Xin, Qu Hemeng, *et al.*. Design of novel catadioptric elliptical dome optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0822002.  
王超, 张新, 曲贺盟, 等. 新型折反射式椭球形整流罩光学系统的设计[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0822002-1.
- 8 Li Lin, Li Yan, Huang Yifan, *et al.*. The research of conformal optical design[C]. SPIE, 2009, 7383: 73833M.
- 9 Zhang Bingna, Zhang Liang, Huang Genghua, *et al.*. Research on dual-mode hybrid detection technology using laser to point directed by infrared camera[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0917001-1.  
张冰娜, 张亮, 黄庚华, 等. 一种红外引导激光指向双模复合探测技术研究[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0917001-1.
- 10 Zhou Zinan, Ma Jun, Yu Pei, *et al.*. Laser/infrared optical system design of common optical path and athermalization[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(1): 012202.  
周子楠, 马军, 尉佩, 等. 激光/红外共光路无热化光学系统设计[C]. 激光与光电学进展, 2015, 52(1): 012202.
- 11 Zhang Guangyi, Feng Zhigao, Yang Jun, *et al.*. Study on the designing technology of the infrared optical dome used in supersonic mode[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2007, 36(6): 1314-1318.  
张义广, 冯志高, 杨军, 等. 超声速红外长波光学整流罩设计技术研究[J]. 人工晶体学报, 2007, 36(6): 1314-1318.

栏目编辑: 韩峰