

# 激光/红外共光路无热化光学系统设计

周子楠<sup>1</sup> 马军<sup>2</sup> 尉佩<sup>1</sup> 蓝岚<sup>1</sup> 王文生<sup>1</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学现代光学测试技术研究室, 吉林 长春 130022

<sup>2</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

**摘要** 基于激光测距和红外目标探测需求,设计了激光/红外共光路无热化光学系统。根据用户要求,系统参数设计如下:焦距为150 mm, $F$ 数为2,工作波段为1.57  $\mu\text{m}$ 和3~5  $\mu\text{m}$ 。1.57  $\mu\text{m}$ 激光波长选用RS-RTM-31243-001-C1型InGaAs光电探测器;3~5  $\mu\text{m}$ 红外波段选用ULIS公司的2/3 inch(1 inch=2.54 cm)红外探测器,对应全视场为4.2°。像质评价结果表明,在温度-50 °C~70 °C范围内,1.57  $\mu\text{m}$ 激光波长各视场点列图均方根半径最大为8.166  $\mu\text{m}$ ,远小于探测器有效接收半径75  $\mu\text{m}$ ,能量集中度高;在截止频率15 lp/mm处,3~5  $\mu\text{m}$ 红外波段各视场调制传递函数(MTF)均在0.78以上,接近衍射受限曲线,像质优良,结构简单,满足用户提出的总体设计要求。

**关键词** 光学设计;激光测距;红外成像;共光路;无热化;调制传递函数

中图分类号 TN216

文献标识 A

doi: 10.3788/LOP52.012202

## Laser/Infrared Optical System Design of Common Optical Path and Athermalization

Zhou Zinan<sup>1</sup> Ma Jun<sup>2</sup> Yu Pei<sup>1</sup> Lan Lan<sup>1</sup> Wang Wensheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Contemporary Optical Measuring Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

<sup>2</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** Based on requirements of infrared target detection and laser ranging, laser/ infrared optical system with common optical path and athermalization is designed. According to user requirements, the parameters of the optical system are defined as: the focal length is 150 mm, the  $F$  number is 2, the operating waveband covers 1.57  $\mu\text{m}$  and 3~5  $\mu\text{m}$ . A RS-RTM-31243-001-C1 InGaAs photoelectric detector is selected for 1.57  $\mu\text{m}$  laser wavelength; and a 2/3 inch (1 inch=2.54 cm) detector of ULIS company is selected for 3~5  $\mu\text{m}$  waveband (the full field of view is 4.2°). The evaluation results of image quality show that, in temperature range of -50 °C~70 °C, maximum value of root mean square (RMS) radius of the spot diagram at each field of view is 8.166  $\mu\text{m}$ , which is far less than the effective receive radius of detector (75  $\mu\text{m}$ ) and the energy concentration is very high at 1.57  $\mu\text{m}$  laser wavelength; at cut-off frequency of 15 lp/mm, modulation transfer function (MTF) of the 3~5  $\mu\text{m}$  infrared waveband are all above 0.78 for each field of view, which is closed to the diffraction-limited curve. So the system has good image quality, simple structure, and meets the user requirements of the optical overall design.

**Key words** optical design; laser ranging; infrared imaging; common optical path; athermalization; modulation transfer function

**OCIS codes** 220.3620; 110.3080; 280.3400; 110.4190; 040.3060

收稿日期: 2014-06-12; 收到修改稿日期: 2014-08-15; 网络出版日期: 2014-12-26

作者简介: 周子楠(1988—),男,硕士研究生,主要从事光学设计和光学仪器等方面的研究。

E-mail: zaazbncc@163.com

导师简介: 王文生(1943—),男,教授,主要从事现代光学设计和现代光学测试技术等方面的研究工作。

E-mail: wwsciom@163.com

## 1 引言

在对军事目标进行探测、跟踪、定位以实现精确打击的要求下,激光测距和红外成像都具有极其重要的作用。因此,在现代战争中,各种机载、舰载、星载甚至手持武器装备都配备了激光测距和红外成像系统<sup>[1]</sup>。

激光测距是激光在军事上应用最早和最成熟的技术。和微波测距等方法相比,激光测距具有更好的方向性和更高的测距精度,测程远,抗干扰能力强,隐蔽性好,因而得到广泛的应用。而可见光范围的激光容易暴露目标,不利于在战场使用,因此多选用红外波段的激光。其中,1.064  $\mu\text{m}$  的激光在激光测距技术中应用极为广泛。但是,却容易带来人眼损伤甚至致盲的危险。而1.57  $\mu\text{m}$  激光波长处于近红外大气窗口,战场烟雾的穿透能力极强,对人眼来说接近“零伤害”,已经成为新一代人眼安全激光装备的首选波长。因此这一波长的器件被广泛应用于制导、雷达、测距等领域<sup>[2]</sup>。

红外成像作为一种广泛使用的夜视技术,与人工照明或微光成像相比,不需要任何辅助照明方式或微光条件。由于大气吸收,红外辐射的两个窗口,分别为3~5  $\mu\text{m}$  和8~12  $\mu\text{m}$ ,这两个波段在导航系统、探测与搜索、光学成像等领域具有广泛的应用<sup>[3]</sup>。

基于测距和红外目标探测的需要,激光/红外复合光学系统得到了高度的重视。文献[4]报道了基于大视场高分辨率的红外/激光复合光学系统设计,该系统采用激光/红外共口径结构,由7片透镜和1个分光棱镜组成,并采用2个非球面和1个二元面,结构复杂。其中,中红外成像系统焦距为63 mm, $F$ 数为2,全视场为5.5°,可在温度-40  $^{\circ}\text{C}$ ~60  $^{\circ}\text{C}$  范围内实现无热化设计。文献[5]报道了人眼安全下的红外/激光导引头光学系统设计,该系统可用于武器的精确制导。其中,红外成像系统焦距为140 mm, $F$ 数为2,全视场角为1.96°,由5片透镜和1个分光棱镜组成,该系统也采用了1个非球面,可在温度-40  $^{\circ}\text{C}$ ~60  $^{\circ}\text{C}$  范围内实现无热化设计。文献[6]报道了红外/激光双模导引头光学系统设计,该系统采用卡式共口径结构,由主、次反射镜和3个补偿透镜组成,加工装调比较困难。其中红外成像系统焦距为140 mm, $F$ 数为2,全视场为5°,未进行无热化设计。本文针对用户的需求,设计了激光/红外共光路无热化光学系统,仅用4片透镜和1个分光棱镜,结构简单,像质优良。在温度-50  $^{\circ}\text{C}$ ~70  $^{\circ}\text{C}$  范围内,实现了1.57  $\mu\text{m}$  激光测距,3~5  $\mu\text{m}$  红外成像。

## 2 设计原理

### 2.1 激光测距原理

1.57  $\mu\text{m}$  半导体激光器是理想的激光通信光源,又由于人眼安全特性,使其成为激光测距等领域的最佳光源。1.57  $\mu\text{m}$  激光处于1.5~1.8  $\mu\text{m}$  大气窗口,对烟、雾的穿透能力强,受外界环境干扰很小,且对应于室温工作的Ge和InGaAs探测器的探测灵敏区,无需低温制冷。因此,1.57  $\mu\text{m}$  激光成为军事等领域的主要应用对象<sup>[7]</sup>。

激光测距的基本原理是利用光在待测距离上往返传播的时间换算出距离 $L$ ,其方程为

$$L = \frac{1}{2}ct, \quad (1)$$

式中 $c$ 为激光在大气中的传播速度; $t$ 为激光在待测距离上的往返传播时间。

按照不同检测时间 $t$ 的方法,激光测距又分为相位激光测距和脉冲激光测距。本文采用脉冲激光测距。其原理为利用激光测距仪发射一个光脉冲射向目标,经目标反射,再由测距仪接收反射脉冲,用电子系统测得这两个脉冲先后的时间差 $t$ ,就可求出目标到测距仪的距离 $L$ 。所以脉冲激光测距是通过直接测量激光在待测距离上的往返时间从而求得距离<sup>[8]</sup>。

激光器采用中科院安徽光学精密机械研究所研制的一种加固型内腔式1.57  $\mu\text{m}$  人眼安全光学参量振荡器(OPO)激光器,其能量为5.3 mJ,脉冲宽度约为6 ns,发散角约为5 mrad,重复频率为3 Hz<sup>[9]</sup>。激光发射系统是对激光器发出的高斯光束进行准直、扩束<sup>[10]</sup>,以增大作用距离,压缩光束的发散角。在发射系统中常采用望远镜系统,根据不同的目镜类型可分为伽利略望远镜系统和开普勒望远镜系统。

### 2.2 光学系统探测原理

红外成像光学系统属于被动探测,通过捕获目标辐射的红外信号来成像,有良好的隐蔽性,搜索范围大,抗干扰能力强,可以全天候工作。但是,红外成像系统只能探测二维图像,缺少距离信息。而激光测距

可以克服有烟雾的环境,具有很强的大气穿透能力,可测得距离信息。

激光发射系统和激光/红外共光路无热化接收系统并行放置,光轴大致平行。在激光发射和接收共系统中,由于棱镜的半反半透分光膜的分光作用,发射和接收各损失一半的光能。而接收系统的立方棱镜中的膜层是对 1.57  $\mu\text{m}$  反射,而对 3~5  $\mu\text{m}$  的波段透射,这样相对于激光发射和接收共系统的结构,损失的激光光能减少为原来四分之一,同时又使激光/红外无热化接收系统共光路。这样设计的系统接收的激光光能是原激光发射和接收共光路系统的 4 倍,可以提高测距距离。利用 1.57  $\mu\text{m}$  激光器发射出的激光,经发射系统准直、扩束,照射到被测目标上,与目标产生的红外辐射,共同经过激光/红外共光路无热化光学系统,其中 3~5  $\mu\text{m}$  红外波段透过分光棱镜,在红外探测器上得到目标图像;而 1.57  $\mu\text{m}$  激光经分光棱镜反射,被 RS-RTM-31243-001-C1 型 InGaAs 光电探测器探测,获得距离信息。

### 2.3 无热化原理

根据红外光学系统的技术要求,目前国内外红外系统的消热技术大体分为三类,即机械被动式消热、电子主动式消热和光学被动式消热。机械被动式和电子主动式方法是两种比较传统的方法,但是两种方法都引入了补偿装置,系统很重,体积大,可靠性和环境稳定性也不好。而光学被动式方法利用光学材料热特性之间的差异进行相互补偿来减小离焦量,具有结构简单、尺寸小,系统可靠性高等优点。因此,实验中采用光学被动式方法进行无热化设计。

为了保证激光/红外共光路光学系统在 -50  $^{\circ}\text{C}$ ~70  $^{\circ}\text{C}$  范围内成像质量优良,必须消除温度对像质的影响,进行无热化设计<sup>[11]</sup>。材料折射率是构成透镜光焦度的主要参数,与温度和波长都有关系。因此,透镜的光焦度会随温度、波长而变化。对于无热化光学系统,即要满足总光焦度要求,又要满足消热差和消色差条件,可用三片式结构达到:

$$\Phi = \frac{1}{h_1} \sum_{i=1}^k h_i \phi_i, \quad (2)$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = \phi_A T_A + \phi_B T_B + \phi_C T_C, \quad (3)$$

$$\begin{cases} \phi_A = \frac{\Phi V_A (T_B V_B - T_C V_C)}{D} \\ \phi_B = \frac{\Phi V_B (T_C V_C - T_A V_A)}{D} \\ \phi_C = \frac{\Phi V_C (T_A V_A - T_B V_B)}{D} \end{cases}, \quad (4)$$

$$D = V_A (T_B V_B - T_C V_C) + V_B (T_C V_C - T_A V_A) + V_C (T_A V_A - T_B V_B), \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^k C_i \phi_i = h^2 \sum_{i=1}^k \frac{\phi_i}{\nu_i} = 0, \quad (6)$$

式中  $h_i$  指轴上近轴光线在各透镜上的高度,  $\phi$  为透镜的光焦度,  $\Phi$  为总光焦度,  $\nu$  为阿贝数,  $C_i$  为透镜色差系数。

利用光学材料热特性之间的差异,在保持总光焦度不变的情况下,通过不同材料组合和光焦度的分配来消除温度的影响,从而在 -50  $^{\circ}\text{C}$ ~70  $^{\circ}\text{C}$  环境温度范围内具有良好的像质<sup>[12]</sup>。

## 3 光学系统设计

### 3.1 技术指标

根据用户的需求,激光/红外共光路无热化光学系统的技术指标如下:波长为 1.57  $\mu\text{m}$  和 3~5  $\mu\text{m}$ ,焦距为 150 mm,  $F$  数为 2。1.57  $\mu\text{m}$  激光波长选用 RS-RTM-31243-001-C1 型 InGaAs 光电探测器,响应度为 0.9 A/W,有效孔径为 75  $\mu\text{m}$ ; 3~5  $\mu\text{m}$  红外波段选用 ULIS 公司的 2/3 inch (1 inch=2.54 cm) 红外探测器,分辨率为 240 pixel $\times$ 320 pixel,像元尺寸为 35  $\mu\text{m}$  $\times$ 35  $\mu\text{m}$ ,全视场为 4.2 $^{\circ}$ 。要求在温度 -50  $^{\circ}\text{C}$ ~70  $^{\circ}\text{C}$  范围内,1.57  $\mu\text{m}$  激光波长弥散斑小于探测器有效孔径 75  $\mu\text{m}$ ,在截止频率为 15 lp/mm 时,3~5  $\mu\text{m}$  红外波段各视场调制传递函数(MTF)大于 0.5,以满足测距/成像共光路无热化的要求。

### 3.2 材料选取

为了更好地校正色差,红外光学系统应当在满足结构简单的同时,使用不同的光学材料。在满足 $1.57\ \mu\text{m}$ 激光波长和 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 红外波段的同时,常用的透镜材料有硅,硒化锌(ZnSe),硫化锌(ZnS\_broad)和氟化镁( $\text{MgF}_2$ )。硅是一种化学惰性材料,硬度高,不溶于水,在 $1\sim 7\ \mu\text{m}$ 波段具有良好的透光性能。硒化锌具有纯度高,环境适应能力强,易于加工等特点,硫化锌在很多方面与硒化锌类似,只是硫化锌价格更低,结构更牢固。氟化镁在紫外、可见和红外波段具有较好的透射率,在校正二级光谱方面有较大的作用<sup>[13]</sup>。

### 3.3 初始结构确定

从技术指标可以看出,此光学系统的相对口径较大,工作距离较长,所以红外系统至少要选用三片以上的透镜,通过文献选取的初始结构没有分光棱镜,无法分别接受激光和红外信号,故需加入分光棱镜。如图1所示为加入分光棱镜的光学系统结构图,系统结构参数如表1所示,其 $1.57\ \mu\text{m}$ 激光波长点列图如图2所示, $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 红外波段MTF曲线如图3所示。由图可知, $1.57\ \mu\text{m}$ 激光波长的弥散斑的均方根半径最大为 $784.207\ \mu\text{m}$ ,能量集中度低; $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段的MTF曲线非常差,距离衍射受限曲线较远。

表1 系统结构参数

Table 1 Structure parameters of system

Surface	Radius/mm	Thickness/mm	Glass
1	86.566	8.346	Silicon
2	125.426	6.768	
3	251.112	4.159	ZnSe
4	184.647	78.791	
5	-41.125	3.969	ZnS_broad
6	-59.461	10	
7	Infinity	18	Silicon
8	Infinity	10	

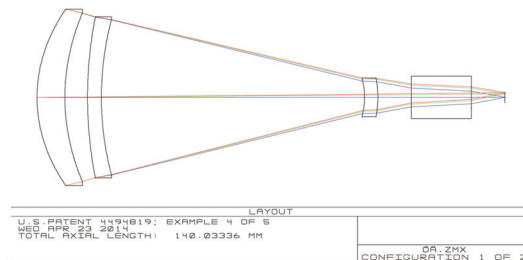
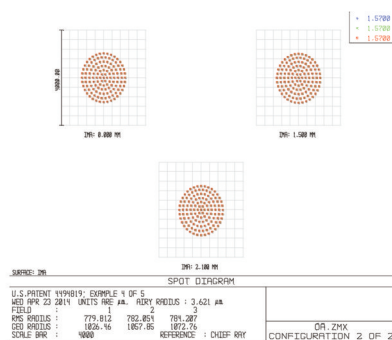
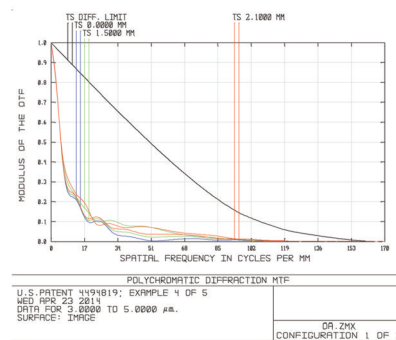


图1 光学系统初始结构图

Fig.1 Initial structure diagram of optical system

图2  $1.57\ \mu\text{m}$  点列图Fig.2 Spot diagram of  $1.57\ \mu\text{m}$ 图3  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  MTF 曲线Fig.3 MTF curves of  $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 

### 3.4 设计分析

利用Zemax光学软件多重结构的方法进行优化设计,表2表示用不同波段不同温度的多重组态的约束



变量。设计时使反射棱镜展开成平行平板,在会聚光路中会产生除场曲以外的全部像差,所以校正像差时应使透镜和平行平板一起校正。初始结构采用望远型,前组为正,由2个透镜组成;后组为负,仅由1个透镜组成;组合后的系统需满足校正球差、彗差、像散、场曲和色差。由于系统必须同时满足 $1.57\ \mu\text{m}$ 激光波长和 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 红外波段的像差校正,以及无热化的设计要求,所以需要适当选择光学材料。第一块透镜和分光棱镜的材料选用硅,其折射率大(3.43234)有利于校正球差,阿贝数 $\nu$ 也较大(236.5);第二块透镜选用硒化锌,其折射率小(2.4331),阿贝数 $\nu$ 较小(176.9);第三块透镜选用硫化锌,其折射率小(2.367),阿贝数 $\nu$ 非常小(15.3046),正负透镜三种材料组合可以校正球差和色差。同样3种材料热差系数也相差较大,有利于校正系统的热差。最后利用光阑位置变化来校正像散和倍率色差。

图2、图3表明该激光/红外共光路无热化光学系统像差过大,而该系统各面对像差的贡献如图4所示,可知系统存在较大的球差、彗差和色差。设计表明,利用3片透镜补偿反射棱镜的像差后,很难满足激光/红外共光路无热化的要求,故采用分裂透镜的方法,增加1片透镜,选用 $\text{MgF}_2$ 材料,以减小小像差。

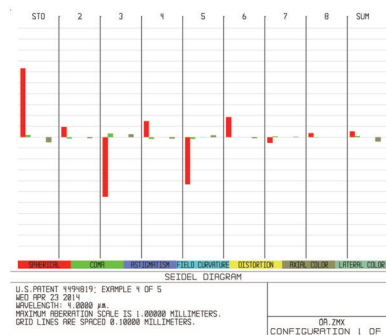


图4 赛德尔系数表

Fig.4 Seidel diagram

表2 多重组态图表

Table 2 Multi-Configuration diagram

Active:1/6		Config1	Config2	Config3	Config4	Config5	Config6
1:Wave	1	3.000	1.570	3.000	1.570	3.000	1.570
2:Wave	2	4.000	1.570	4.000	1.570	4.000	1.570
3:Wave	3	5.000	1.570	5.000	1.570	5.000	1.570
4:Temp	0	20.000	20.000	-50.000	-50.000	70.000	70.000

### 3.5 设计结果

利用Zemax软件对系统进行优化设计,图5为激光/红外球面系统共光路接收系统结构图,系统由4片球面透镜和1个分光棱镜组成。在分光棱镜斜面进行光学镀膜,使得 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 红外波段透过分光棱镜,被红外探测器探测,获得目标图像;由激光器发出的 $1.57\ \mu\text{m}$ 激光经分光棱镜反射,被激光探测器探测,并由电子系统测得发射脉冲和接收脉冲先后的时间差 $t$ ,获得距离信息。系统的材料分别为硅、 $\text{ZnS\_broad}$ 、 $\text{MgF}_2$ 、 $\text{ZnS\_broad}$ 和硅,焦距 $150\ \text{mm}$ , $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 红外波段光学系统筒长为 $193.79\ \text{mm}$ , $1.57\ \mu\text{m}$ 激光波长光学系统筒长为 $193.957\ \text{mm}$ ,实现了激光测距/红外成像系统球面共光路,棱镜分束探测接收,并在温度 $-50\ ^\circ\text{C}\sim 70\ ^\circ\text{C}$ 范围内,实现无热化,结构简单,像质优良。

激光测距系统是能量系统,故用点列图来评价系统质量,由点列图中弥散斑大小和形状直接判断出系统光斑能量的空间分布情况,可适用于 $1.57\ \mu\text{m}$ 非成像光学系统。图6(a)~(c)为 $1.57\ \mu\text{m}$ 激光波长点列图,可知,在温度 $-50\ ^\circ\text{C}\sim 70\ ^\circ\text{C}$ 范围内,在最佳像距为 $8.957\ \text{mm}$ 时, $1.57\ \mu\text{m}$ 激光波长系统各视场弥散斑的均方根半径最大为 $8.166\ \mu\text{m}$ ,远小于探测器有效孔径 $75\ \mu\text{m}$ ,系统像面稳定,能量集中度高。

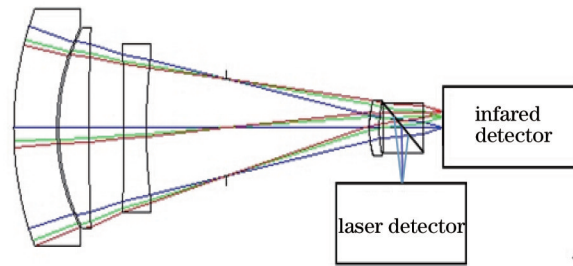
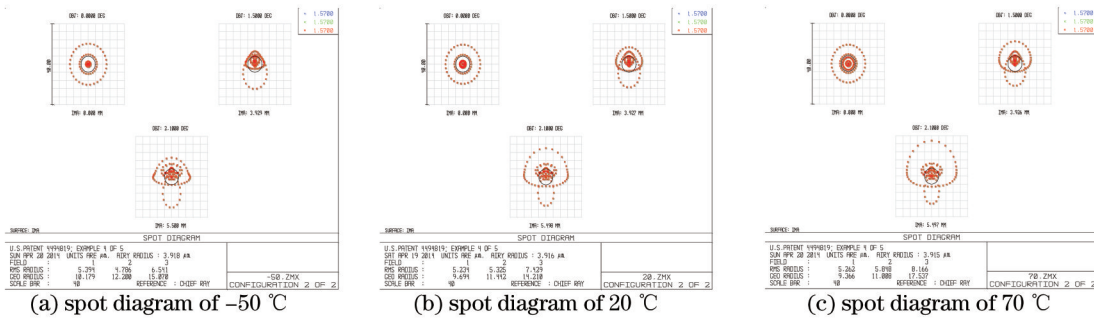
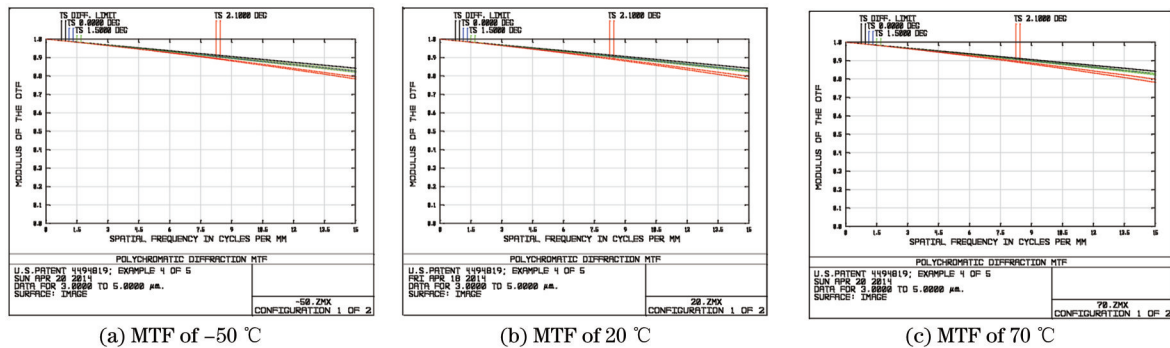


图5 激光/红外光学系统结构图

Fig.5 Structure diagram of laser/ infrared optical system

图6 1.57  $\mu\text{m}$  激光波长点列图Fig.6 Spot diagram of 1.57  $\mu\text{m}$  laser wavelength

成像光学系统通常以MTF来评价其成像质量,图7(a)~(c)为3~5  $\mu\text{m}$  红外波段的MTF曲线。在温度-50  $^{\circ}\text{C}$ ~70  $^{\circ}\text{C}$ 范围内,在最佳像距为8.790 mm、截止频率15 lp/mm时,各视场的MTF曲线大于0.78,接近衍射受限曲线,系统像面稳定,满足光学系统的设计要求。

图7 3~5  $\mu\text{m}$  波段 MTF 曲线Fig.7 MTF curves of 3~5  $\mu\text{m}$  waveband

## 4 结 论

基于用户激光测距和红外目标探测的需求,设计了激光/红外共光路无热化光学系统,光学系统仅由4片透镜和1个分光棱镜组成。在温度-50  $^{\circ}\text{C}$ ~70  $^{\circ}\text{C}$ 范围内,1.57  $\mu\text{m}$  激光波长系统各视场弥散斑的均方根半径最大为8.166  $\mu\text{m}$ ,远小于探测器有效孔径75  $\mu\text{m}$ ,能量集中度高;3~5  $\mu\text{m}$  红外波段系统的MTF大于0.78,接近衍射受限曲线,像质优良。相对于其他“激光/红外共口径光学系统”的设计文献,透镜片数少,没有添加非球面和二元面,球面系统共光路,结构简单,像质优良。

## 参 考 文 献

1 Wang Lirong, Shi Peng, Li Huajie. Design and fabrication of eye-safe ranging and infrared imaging filter film[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(1): 133-137.

王丽荣,石 澎,李华杰.人眼安全激光测距与红外成像滤光膜的研制[J].应用光学,2013,34(1):133-137.

- 2 Liu Xu, Cheng Yong, Wang Shuyun, *et al.*. Application of prism resonator in 1.57  $\mu\text{m}$  eye-safe OPO laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S2): 351-356.  
刘旭, 程勇, 王淑云, 等. 棱镜腔技术在 1.57  $\mu\text{m}$  人眼安全 OPO 激光器中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(S2): 351-356.
- 3 Zhang Xingde, Li Ronggang, Liu Lin, *et al.*. Research and development of dual-band infrared camera system[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(8): 801-804.  
张兴德, 李荣刚, 刘琳, 等. 红外双波段成像系统的研究与发展[J]. *激光与红外*, 2010, 40(8): 801-804.
- 4 Cong Haijia. Complex Optical System Design for Infrared/Laser with Large Field of View and High Resolution[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.  
丛海佳. 大视场高分辨率红外/激光复合光学系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- 5 Fu Yanhui. Study on the Optical System of Eye Safe Imaging Infrared/Laser Seeker[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.  
付彦辉. 人眼安全下红外/激光导引头光学系统总体设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- 6 Zuo Baojun, Kuang Yaowu. Optical design of IR/ladar dual-mode seeker[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 495-499.  
左保军, 况耀武. 红外/激光双模导引头的光学系统[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(3): 495-499.
- 7 Lu Changyong, Wang Xiaobing, Guo Yanlong, *et al.*. Principle and evolution of 1.5  $\mu\text{m}$  wavelength eye-safe military laser rangefinder[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, 42(3): 32-35.  
卢常勇, 王小兵, 郭延龙, 等. 1.5  $\mu\text{m}$  波长人眼安全的军用激光测距机及其进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, 42(3): 32-35.
- 8 Zheng Ruitong, Wu Guanhao. Infrared pulsed semiconductor laser range finder[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(Supplement): 134-138.  
郑睿童, 吴冠豪. 红外半导体脉冲激光测距系统[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(增刊): 134-138.
- 9 Chen Bo, Cheng Yong. Consolidated design of eye-safe OPO laser[J]. *Laser Technology*, 2004, 28(1): 91-93.  
陈波, 程勇. 加固型人眼安全 OPO 激光器的设计[J]. *激光技术*, 2004, 28(1): 91-93.
- 10 Gong Dun, Wang Hong, Tian Tiejun, *et al.*. The optical design of high-power laser-beam expander[J]. *Laser Technology*, 2009, 33(4): 426-428.  
巩盾, 王红, 田铁印, 等. 大功率激光扩束器的光学设计[J]. *激光技术*, 2009, 33(4): 426-428.
- 11 Wu Xiaojing, Meng Junhe. Approach of athermalizing infrared optical systems[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(6): 572-576.  
吴晓靖, 孟军和. 红外光学系统无热化设计的途径[J]. *红外与激光工程*, 2003, 32(6): 572-576.
- 12 Liu Yingying, Pang Bo, Du Yunan, *et al.*. Optical design of athermalized infrared telephoto objective lens[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2013, 34(5): 858-862.  
刘莹莹, 庞博, 杜玉楠, 等. 红外无热化望远物镜设计[J]. *半导体光电*, 2013, 34(5): 858-862.
- 13 Mu Da, Dong Jianing, Xu Chunyun. Infrared telephoto optical system design used in joint transform correlator [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2012, 33(12): 111-113.  
牟达, 董佳宁, 徐春云. 基于联合变化相关器的红外望远光学系统设计[J]. *四川兵工学报*, 2012, 33(12): 111-113.

栏目编辑: 韩峰