

## 中波/长波双色多视场光学系统设计

张良, 毛鑫, 王合龙

(中国航空工业集团公司 洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471023)

**摘要:**设计了一种基于中/长波双色焦平面阵列探测器的红外多视场变焦距光学系统,通过在窄视场光路中插入不同镜组的方式实现宽、中、窄视场的转换,并利用谐衍射原理和非球面设计进行像差平衡,其工作波长范围为中波 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 、长波 $7.7\sim 9.5\ \mu\text{m}$ ,F数为3,变倍比达到18:1.设计结果表明,在中长波双色工作模式下,中长波各个视场的MTF均接近衍射极限、中波红外70%的能量分布在一个探测器像元内、长波红外60%的能量分布在一个探测器像元内、温度适应性好.该双色多视场光学系统在军民用光电探测领域有重要作用和广阔的市场前景.

**关键词:**双色;多视场;谐衍射;温度分析

**中图分类号:**TN216 **文献标识码:**A

## The design of MWIR/LWIR multiple FOV optical system

ZHANG Liang, MAO Xin, WANG He-Long

(The Electro-optical Equipments Institute of AVIC, Luoyang 471023)

**Abstract:** The design of an infrared multiple FOV optical system with a MWIR/LWIR dual-band staring focal plane array detector was introduced. Wide medium narrow FOV was realized by inserting different sets of lens groups in narrow optical path. The harmonic diffraction theory and aspheric design method were used in the aberration balance. The operating wavelength region is  $3\text{ to }5\ \mu\text{m}$  and  $7.7\text{ to }9.5\ \mu\text{m}$ , F-number is 3, and zoom ratio is 18:1. The results indicate that the modulation transfer functions (MTF) of all FOV are approaching to diffraction limit, 70 percent medium-wave infrared encircled energy and 60 percent long-wave infrared encircled energy are concentrated in one pixel of detector. Moreover, it could obtain well optical performance in all temperature range. The dual-band optical system could be widely applied in military and civilian opto-electronic detective fields.

**Key words:** dual-band; multiple FOV; harmonic diffraction; temperature analysis

**PACS:** 42.15.Eg, 07.57.Kp

### 引言

在大气环境中,目标的红外辐射只能在 $1\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 、 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 三个窗口内有效传输.一般探测系统面对的背景成分复杂,有阳光、云层和干扰物等,需要采用相应的技术来识别真实目标.真实目标的运动特性及目标和干扰物光谱分布的差异,是红外系统中用来识别目标和干扰物的常用方法.然而,现在的红外系统绝大多数工作在其中某个单一波段,由于红外系统使用区域的不同、气

候温度的改变、目标的伪装,单一波段的系统获取的信息减弱,特别是探测目标本身的操作或者行为的改变导致辐射波段移动等原因,使成像系统探测不到目标或者探测准确度下降.

如果一个红外成像系统能同时在其中两个波段获取目标信息,就可对复杂的背景进行抑制,提高对目标的探测效果,在预警、搜索和跟踪系统中能明显的降低虚警率<sup>[1]</sup>.

目前,国内在双色探测技术研究方面做的主要工作集中在基于双波段探测器的单视场光学系统和

收稿日期:2012-04-12,修回日期:2012-06-28

基金项目:洛阳电光设备研究所预研基金(Y2012J04)

Foundation items: Supported by Aduaned Foundation of Luoyang Electro-optical Equipments Institute (Y2012J04).

作者简介 (Biography): 张良 (1973-), 男, 河南开封人, 高级工程师, 工学硕士, 主要研究领域为红外系统总体设计、红外光学系统设计. E-mail: zhangliang\_ly@163.com.

Received date: 2012-04-12, revised date: 2012-06-28

基于两个单色探测器通过分光实现双色探测的光学系统,为了适应红外双波段探测系统的发展和多视场探测的使用要求,在此基于凝视型双色红外焦平面阵列探测器,设计了一个中、长波双色共孔径多视场变焦距光学系统.

## 1 设计原理

### 1.1 谐衍射成像原理

1995年 Sweeney 和 Sommargren 及 Faklis 和 Morris 分别提出了谐衍射透镜的概念<sup>[2]</sup>. 谐衍射透镜也称为多级衍射透镜,其特点是相邻环带间的光程差是设计波长  $\lambda_0$  的整数  $p$  ( $p \geq 2$ ) 倍,在空气中透镜最大厚度为  $p\lambda_0/(n-1)$ ,是普通衍射透镜的  $p$  倍.  $p$  表示光通过谐衍射透镜时所产生的最大相位差不再是  $2\pi$ ,而是  $2p\pi$ . 如图 1 所示,左边为普通衍射透镜或称为模  $2\pi$  衍射透镜,右边为谐衍射透镜.

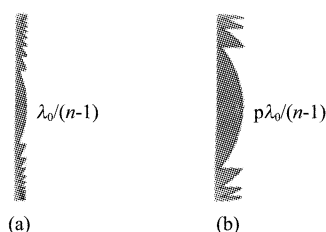


图 1 谐衍射元件和普通衍射元件对比  
Fig. 1 Contrast of diffraction lens and harmonic lens

谐衍射透镜的焦距特性可表示为:  $f = \frac{p\lambda_0}{m\lambda} f_0$ , (1)

$m$  是波长  $\lambda$  对应的谐振级次,  $\lambda_0$  是设计波长,  $f_0$  是设计波长对应的焦距. 当  $m\lambda = p\lambda_0$  时,  $f = f_0$ , 即不同波长  $\lambda$  其  $m$  级谐振光波均汇聚到共同的焦点  $f_0$  处.

谐衍射透镜各衍射级次的衍射效率可表示为:

$$\eta_m = |F_m|^2 = \sin^2 \left( \frac{p\lambda_0}{\lambda} - m \right). \quad (2)$$

当满足式:  $p\lambda_0/\lambda - m = 0$  时, 理论衍射效率就可以达到 100%. 即  $p\lambda_0/m = \lambda$ , 其中  $m = p, p \pm 1, p \pm 2, \dots$  所得的一系列分离波长称为谐波长<sup>[3~6]</sup>. 当偏离设计波长时, 虽然谐衍射元件的  $p$  级衍射效率比  $+1$  级下降得更快, 但通过合理的设计, 可以利用其他级次衍射光. 在谐波长的位置达到 100% 衍射效率, 并在谐波长附近的一定波段内达到很高的衍射效率.  $p$  越大, 波段内可以利用的谐波长就越多, 所覆盖的波段也越宽. 但是, 随着  $p$  的增大, 材料色散的影响也越大, 因此  $p$  的取值实际上就是折射透镜

色散和衍射透镜色散的平衡问题.

### 1.2 多视场变倍原理

国内外红外多视场变倍光学系统普遍采用的实现方式, 分为切入方式<sup>[7]</sup>和轴向移动方式. 切入方式通过不同变倍镜组切换的方式实现视场的转换. 轴向移动方式通过变倍镜组与补偿镜组在光轴上移动不同位置实现视场的转换. 本文采用切入方式实现红外多视场.

图 2 为切入式多视场光学系统原理图, 窄视场光路是基本光路构成长焦光学系统, 中视场光路通过在窄视场光路中切入中视场变倍镜组 (-) 构成中焦光学系统, 宽视场光路在窄视场光路中切入宽视场变倍镜组 (-) 构成短焦光学系统.

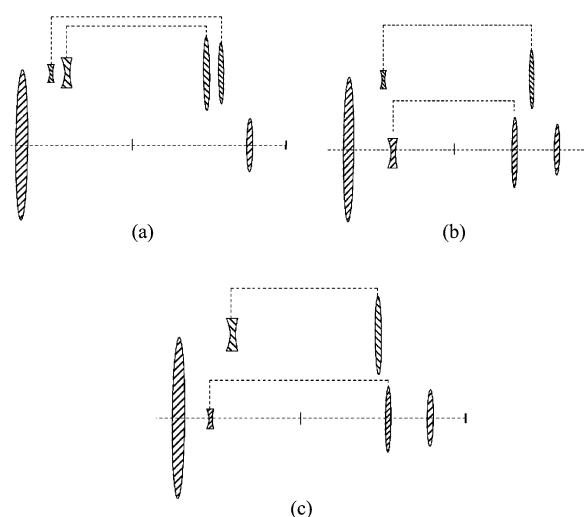


图 2 多视场切换光学系统原理图  
Fig. 2 Principle layout of multiple FOV zoom optical system

为了便于光学系统初始参数求解, 将光路进行简化如图 3 所示, 整个光学系统由透镜  $L_1, L_2, L_3, L_4$  构成. 窄视场光路由透镜  $L_1$  和  $L_4$  构成, 其中  $L_4$  为场镜, 放大倍率为 1, 其作用是将  $L_1$  形成的中间成像到探测器像面上, 该光路是一个二次成像光路. 透镜  $L_1, L_4$  和透镜  $L_2, L_3$  可组合形成中视场光路或宽视场光路.

设透镜  $L_1, L_2, L_3, L_4$  对应的光焦度分别为  $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$ , 间隔分别为  $d_{12}, d_{23}, d_{34}$ , 光线在透镜  $L_1, L_2, L_3$  上的入射高度分别为  $h_1, h_2, h_3$ , 光线入射和出射角分别为  $u_1, u_1', u_2, u_2', u_3, u_3'$ , 窄视场、中视场、宽视场焦距分别为  $f_{\text{narrow}}, f_{\text{medium}}, f_{\text{wide}}$ .

根据公式<sup>[8]</sup>:  $\tan u' = \tan u + h\phi$  和  $\tan u_1' = \tan u_2$ , 列出以下方程,

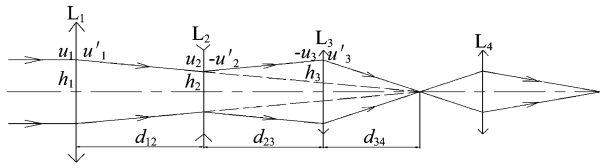


图3 光路追迹图  
Fig.3 Diagram of ray trace

$$\tan u_1' = h_1 \phi_1 \tag{3}$$

$$\tan u_2' = h_2 \phi_2 + h_1 \phi_1 \tag{4}$$

$$\tan u_3' = h_3 \phi_3 + h_2 \phi_2 + h_1 \phi_1 \tag{5}$$

$$h_2 = h_1 - d_{12} \tan u_1' \tag{6}$$

$$h_3 = h_2 - d_{23} \tan u_2' \tag{7}$$

$$\text{中视场倍率: } M_{\text{medium}} = f_{\text{narrow}}' / f_{\text{medium}}' \tag{8}$$

$$\text{宽视场倍率: } M_{\text{wide}} = f_{\text{narrow}}' / f_{\text{wide}}' \tag{9}$$

以上等式求解可得透镜  $L_2$ 、 $L_3$  的光焦度:

$$\phi_2 = -\frac{(M-1)(1/\phi_1 - d_{12} - d_{23})}{d_{23}(1/\phi_1 - d_{12})} \tag{10}$$

$$\phi_3 = -\frac{(M-1)(1/\phi_1 - d_{12})}{Md_{23}(1/\phi_1 - d_{12} - d_{23})} \tag{11}$$

对于一个给定的系统,  $\phi_1$ 、 $d_{12}$ 、 $d_{23}$  可以设定, 当  $M$  分别取  $M_{\text{medium}}$ 、 $M_{\text{wide}}$  时, 可分别计算出中视场变倍镜组、宽视场变倍镜组透镜的光焦度  $\phi_2$ 、 $\phi_3$ , 进而可以进一步求解系统初始结构参数.

## 2 双色光学系统设计实例

### 2.1 设计指标

在双色红外光学系统的设计中所采用的是  $320 \times 256$  双色红外焦平面阵列探测器<sup>[9]</sup>, 像元尺寸  $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ , 光学系统设计指标如表 1 所示.

表 1 设计指标

Table 1 Design requirements

Spectral range	3.7~4.8 $\mu\text{m}$ (MW)
	7.7~9.5 $\mu\text{m}$ (LW)
Field of view (FOV)	1.6° (NFOV)
	5.2° (MFOV)
	30° (WFOV)
F-number	f/3
Entrance pupil diameter	140 mm
Overall length	420 mm
Temperature range	-40°C ~ 60°C

### 2.2 光学材料的选择

在红外波段 ( $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 、 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ ) 可用的光学材料非常有限且价格昂贵, 这对红外双色光学系统

的像差校正非常不利, 限制了系统设计时的自由度.

表 2 红外材料光学性能

Table 2 Performance of infrared materials

Material	Spectral range ( $\mu\text{m}$ )	Index of refraction		$dn/dt$ ( $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )
		$\lambda = 4 \mu\text{m}$	$\lambda = 10 \mu\text{m}$	
Germanium	2.0 ~ 17.0	4.024 2	4.000 3	396
Gallium Arsenide	0.9 ~ 16.0	3.324 6	3.295 2	148
GASIR	1.0 ~ 14.0	2.511 6	2.496 0	55
AMTIR1	0.7 ~ 14.0	2.510 6	2.495 3	72
Zinc Selenide	0.22 ~ 20.0	2.433 1	2.406 5	60
Zinc Sulfide	0.37 ~ 14.0	2.251 8	2.200 2	54
Calcium Fluoride	0.13 ~ 12.0	1.409 6	1.300 2	-11

从表 2 中可知, 中波/长波双波段能够使用的红外材料有 GaAs、Ge、ZnSe、ZnS、AMTIR1、GASIR、CaF<sub>2</sub> 等. 考虑到材料的化学稳定性、加工性能、镀膜性能、机械性能, 选取 Ge、ZnSe、ZnS、AMTIR1、GaAs 进行光学系统的像差校正.

### 2.3 p 值选取

由谐衍射理论易知,  $p$  越大衍射效率覆盖的带宽越窄, 所以使  $p$  尽量小. 光学系统设计过程中, 假设谐衍射元件具有分段连续相位分布. 取  $p = 2$ ,  $\lambda_0 = 8.4 \mu\text{m}$  为中心波长. 对应级次  $m = 2, 3, 4, 5$  时的谐振波长分别为  $\lambda = 8.4 \mu\text{m}$ 、 $5.2 \mu\text{m}$ 、 $4.2 \mu\text{m}$ 、 $3.36 \mu\text{m}$ . 如下图 4 所示.

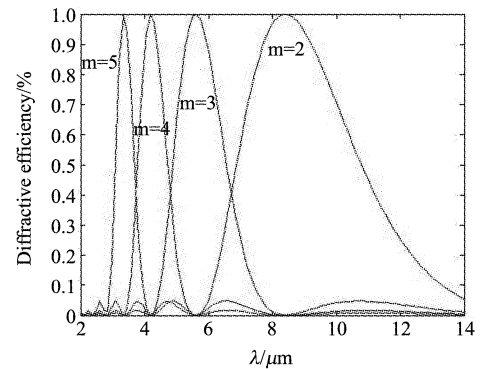


图 4  $p = 2$  时谐衍射透镜不同级次的衍射效率

Fig.4 Harmonic lens diffraction efficiency of different diffractive order

取  $m = 2$ 、 $m = 4$  时分别对应系统的谐振波长  $8.4 \mu\text{m}$ 、 $4.2 \mu\text{m}$ 、 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$  和  $7.7 \sim 9.5 \mu\text{m}$  为工作波段, 覆盖的频谱区衍射效率达 80% 以上.

### 2.4 双色光学系统仿真

根据设计指标可以确定窄、中、宽视场的焦距分别为 420 mm、130 mm、22.4 mm,  $M_{\text{medium}}$ 、 $M_{\text{wide}}$  分别为 3.23、18.75, 代入式 (11)、(12) 求解, 确定系统初始结构参数见表 3 所示.

表 3 初始结构参数

Table 3 Optical initial structure parameters

Lens group	Focal length(mm)	$d_{12}$ (mm)	$d_{23}$ (mm)
$L_1$	376.75	—	—
$L_2$ (中视场)	-55.08	40	90
$L_3$ (中视场)	95.52	—	—
$L_2$ (宽视场)	-9.626	25	115
$L_3$ (宽视场)	81.76	—	—
$L_4$	19.86	—	—

将光学系统设为多重结构,在上表基础上同时对多重结构进行优化,优化过程中可以放开变倍镜组光焦度、间隔的控制,同时加入谐衍射面和非球面进行像差平衡,以获得最优的光路配置参数。

如图 5 所示为最终的光路布局,该系统由前固定镜组、中视场变倍镜组(宽视场变倍镜组)、二次成像镜组,其对系统光焦度的贡献分别为 +、(-、+、+。前固定镜组承担了主要的光焦度,采用球面设计,主要校正球差和轴向色差,变倍镜组采用非球面设计主要校正慧差、轴外像差以及匹兹瓦场曲,二次成像镜组采用谐衍射面和非球面设计,主要校正球差等像差,其中透镜 3 为谐衍射透镜,透镜 4、透镜 6、透镜 8 为非球面透镜。

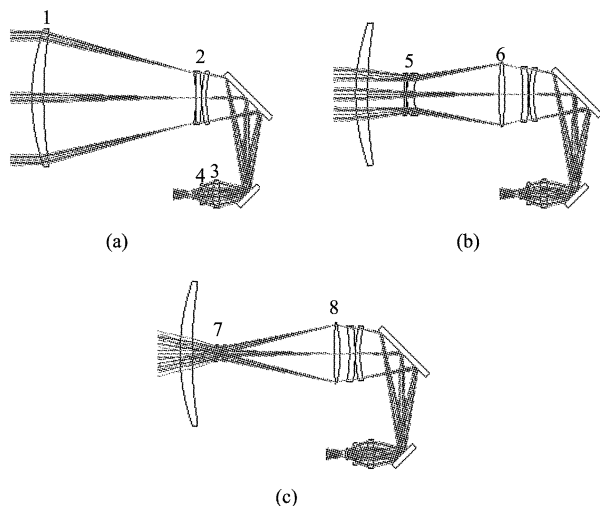


图 5 光路追迹图

Fig. 5 Diagram of ray trace

## 2.5 像质评价

### 2.5.1 传递函数

传递函数是评价红外光学系统像质的主要手段之一,图 6 分别列出了双色光学系统中波、长波段窄、中、宽视场在的光学传递函数图,在对应空间频率 16 lp/mm 处,各视场的传函值都接近衍射极限。

### 2.5.2 能量分布

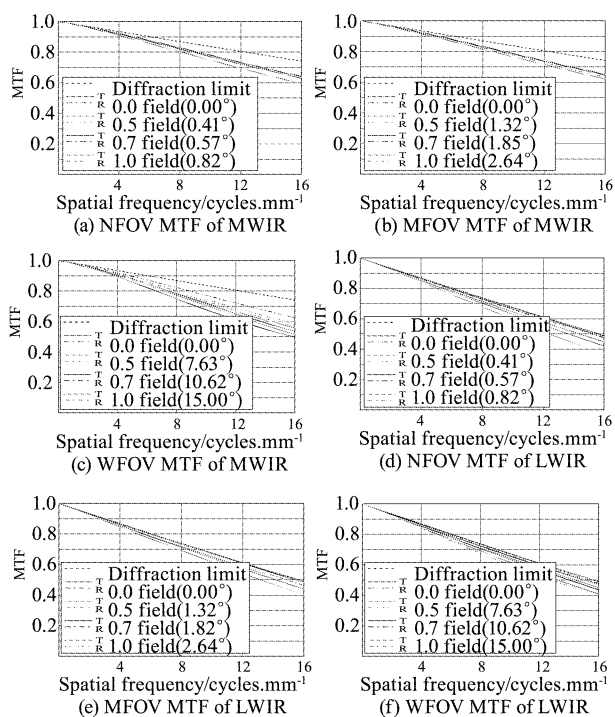


图 6 双色光学系统 MTF 评价

Fig. 6 MTF curve of dual-band optical system

双色光学系统中波、长波段窄、中、宽视场的能量分布曲线如图 7 所示,从图中可以看出,在探测器一个像元内的能量分布,中波能量集中度:  $\geq 70\%$  (轴上)、 $\geq 60\%$  (轴外),长波能量集中度:  $\geq 60\%$  (轴上)、 $\geq 50\%$  (轴外)。

## 3 温度分析

由于红外光学材料的折射率温度系数比可见光光学材料高一个数量级,因此,对于红外光学系统因温度变化造成的曲率、厚度等一些参数的变化对光学系统性能的影响比可见光系统要严重得多,温度变化导致的焦移<sup>[10]</sup>见式(12)。

$$\Delta f = - \left[ f^2 \sum_{i=1}^j \left( \frac{T_i}{f_i} \right) + \alpha_H f \right] \quad (12)$$

式中: $\Delta f$ 为温度变化引起的焦移; $T_i = \left( \frac{dN_i/dt}{N_i - 1} - \alpha_{Li} \right)$ 为光学材料热常数; $f$ 为光学系统焦距; $f_i$ 为第  $i$  个透镜的焦距; $N_i$ 为第  $i$  个透镜的折射率; $dN_i/dt$ 为第  $i$  个透镜的折射率温度系数; $\alpha_H$ 为镜筒线膨胀系数; $\alpha_{Li}$ 为第  $i$  个透镜材料线膨胀系数。

温度变化将导致光学系统的焦距发生变化,像面随温度漂移十分严重,探测器焦平面与光学系统的焦平面不再重合,光学系统性能严重下降,因此,必须采取一定的措施来补偿这种像质变差的现象。

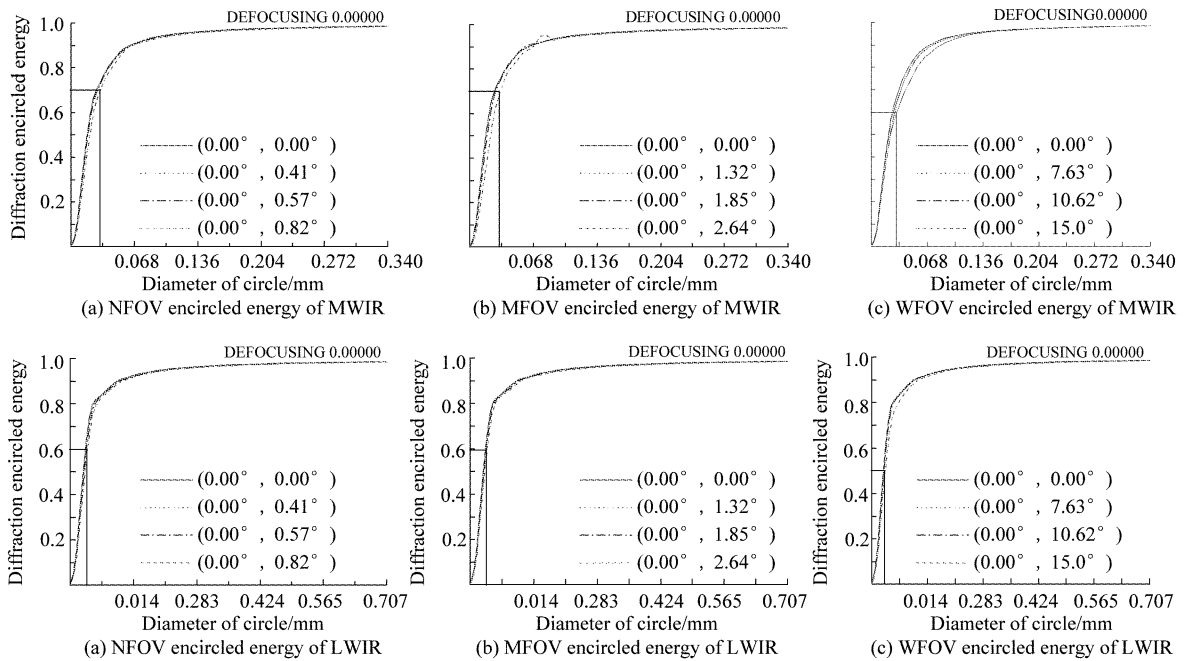


图 7 双色光学系统能量集中度评价图  
 Fig. 7 Encircled energy distribution of dual-band optical system

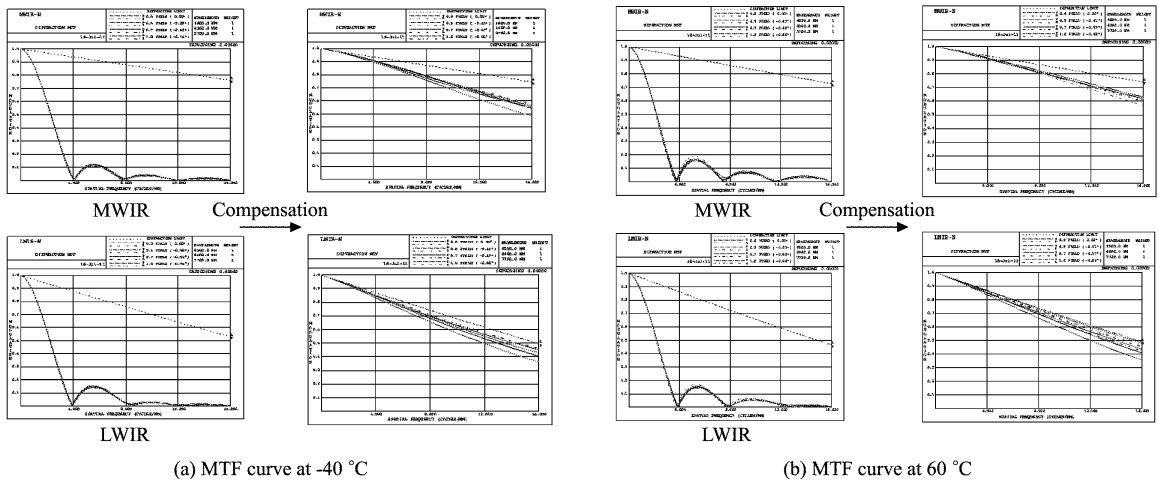


图 8 -40 °C、60 °C 双色光学系统窄视场 MTF 分析  
 Fig. 8 NFOV MTF curve of dual-band optical system at -40 °C and 60 °C

本设计中采用光学主动补偿方式,即通过调焦镜组轴向的少量移动来补偿像质.

以双色光学系统窄视场为例,对系统在-40℃、+60℃下的光学性能进行温度分析,并通过光学主动补偿方式进行温度补偿,仿真结果如图 8 所示.

从图中可知,红外光学系统的性能在高低温环境条件下像质急剧下降,必须进行温度补偿,补偿后的光学性能得到恢复,能够满足使用需求.

### 4 结论

根据红外波段大气窗口的特性、谐衍射透镜的特点以及多视场光学系统的求解方法,合理地确定了双色光学系统的初始结构参数和谐衍射透镜的 p 值,成功地设计了基于中波/长波双色焦平面探测器的双色多视场光学系统,获得了良好的成像质量. 该 (下转页 264 页)

- [7] Crowther B, McKenney D, Mills J. Aberrations of Optical Domes [J]. *SPIE*, 1998, 3482:48 ~ 61.
- [8] JIANG Yang, SUN Qiang, GU Li-shan, *et al.* Design of optical system of HMD using hybrid refractive/diffractive and free-form surfaces [J]. *Optics and Precision Engineering* (姜洋, 孙强, 谷立山, 等. 折/衍混合自由曲面式头戴显示器光学系统设计, *光学精密工程*) 2011, **19**(3):508 - 514.
- [9] CHENG De-Wen, WANG Yong-Tian, HUA Hong, *et al.* Design of an optical see-through head-mounted display with a low f-number and large field of view using a freeform prism [J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(14): 2655 - 2668.
- [10] Mehta P, Hufnagel R. Pressure distribution under flexible polishing tools - Conventional aspheric optics [J]. *SPIE*, 1990, 1303:178 - 188.
- [11] Crowther B, McKenney D, Sparrold S, *et al.* Sensor System with Dynamic Optical Corrector. US Patent Number 6, 201, 230, 2001.
- [12] ZHOU Ren-Zhong, Yan Jin-Xiang. *Adaptive optics theory* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press (周仁忠, 阎吉祥. 自适应光学理论. 北京:北京理工大学出版社), 1996, 310 - 322.
- [13] ZHOU Ren-Zhong. *Adaptive optics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press (周仁忠. 自适应光学. 北京:国防工业出版社), 1996, 160 - 193.

(上接 258 页)

系统中波、长波波段 MTF 值均接近衍射极限, 温度适应性好, 并且该双色多视场光学系统具有结构紧凑、体积小、透过率高等优点. 随着红外双色焦平面探测器的进一步发展, 该系统在目标探测、识别等领域具有广阔的应用前景.

#### REFERENCES

- [1] ZHANG Xing-de, LI Rong-gang, LIU Lin, *et al.* Research and development of dual-band infrared camera system [J]. *Laser & Infrared* (张兴德, 李荣刚, 刘琳, 等. 红外双波段成像系统的研究与发展. *激光与红外*), 2010, **40**(8): 801 - 804.
- [2] SWEENEY D W, SOMMARGREN G E. Harmonic diffractive lense [J]. *Appl. Opt*, 1995, 34(14): 2469 - 2473.
- [3] YAN Shu-Hua. *Design of Diffractive Micro-optics* [M]. Beijing: National Defense Industry Press (颜树华. 衍射微光学设计. 北京: 国防工业出版社), 2011.
- [4] FAN Chang-jiang, WANG Zhao-qi, WU Huan-bao, *et al.* The design of infrared dual-band double-layer harmonic diffractive optical system [J]. *Acta optica sinica* (范长江, 王肇圻, 吴环宝, 等. 红外双波段双层谐衍射光学系统设计. *光学学报*), 2007, **27**(7): 1266 - 1270.
- [5] SUN Qiang, WANG Zhao-qi, LIU Hong-li, *et al.* Optical system of harmonic diffractive/ refractive for infrared dual-color detector [J]. *Infrared and Laser Engineering* (孙强, 王肇圻, 刘宏力, 等. 应用于双色探测器的谐衍射/折射光学系统. *红外与激光工程*), 2003, **32**(3): 317 - 321.
- [6] DONG Ke-yan, PAN Yu-long, WANG Xue-jin, *et al.* Optical design of a HDE infrared dual-band step-zoom system [J]. *Optics and Precision Engineering* (董科研, 潘玉龙, 王学进, 等. 谐衍射红外双波段双焦光学系统设计. *光学精密工程*), 2008, **16**(5): 764 - 770.
- [7] WEN Qing-rong, XU Ming-xuan. Design of triplicate infrared FOV switching mechanics [J]. *Laser & Infrared* (温庆荣, 徐明轩. 切换式红外三视场光机组件的设计. *激光与红外*), 2010, **40**(8): 877 - 879.
- [8] WANG Zhi-jiang. *Optical technology handbook* [M]. Beijing: China Machine Press (王之江. 实用光学技术手册. 北京: 机械工业出版社), 2007.
- [9] WANG Cheng-gang, SUN Hao, LI Jing-guo, *et al.* Trends in two-color infrared focal plane detectors of MCT [J]. *Laser & Infrared* (王成刚, 孙浩, 李敬国, 朱西安. 双色碲镉汞红外焦平面探测器发展现状. *激光与红外*), 2009, **39**(4): 367 - 371.
- [10] LI Lin. *Modern Optical Design Method* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press (李林. 现代光学设计方法. 北京: 北京理工大学出版社), 2009.