

doi:10.3788/gzxb20134212.1519

基于数字微镜器件的共轴红外双波段投影光学系统设计

林丽娜, 宋珊珊, 王文生

(长春理工大学 光电工程学院 现代光学测试技术实验室, 长春 130022)

摘要: 基于动态红外景象模拟技术的需求, 设计了一个基于数字微镜器件的红外双波段投影光学系统: 焦距 150 mm, 相对口径 1:2, 全视场角为 5.3° , 工作波段为红外中波 ($3\sim 5\ \mu\text{m}$) 和红外长波 ($8\sim 12\ \mu\text{m}$). 系统采用共轴式, 由三片球面透镜和一个投影棱镜组成, 使用 Ge、ZnS 和 ZnSe 三种普通红外材料. 引入一个二元光学衍射面, 使系统具有结构简单、重量轻、成本低等优点. 设计结果表明: 在截止频率 17 ly/mm、像距 5.6 mm 时, 光学系统的红外中波的调制传递函数接近 0.7, 红外长波的调制传递函数大于 0.5, 设计结果接近衍射极限, 能够满足红外景象模拟器的总体设计要求.

关键词: 投影光学系统; 红外双波段; 折衍混合; 共轴球面; 数字微镜器件

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)12-1519-5

Projection Optical System Design of Coaxial Dual-band Infrared Based on Digital Micro-mirror Device

LIN Li-na, SONG Shan-shan, WANG Wen-sheng

(Laboratory of Contemporary Optical Measure Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: According to the requirements of the dynamic infrared scene simulator technology, a projection optical system of dual-band infrared based on digital micro-mirror device was designed. The focal length of the projection system was 150 mm, the relative aperture was 1:2, the full field of view was 5.3° and the working wavelength covered the infrared middle wavelength ($3\sim 5\ \mu\text{m}$) and infrared long wavelength ($8\sim 12\ \mu\text{m}$). The system chose coaxial type and consisted of only three pieces of spherical lens and one projection prism. Ge, ZnS and ZnSe were used in the system. This system was simple, light weigh and low cost by introducing one binary surface. The designing results show: at the cut-off frequency 17 ly/mm and the image distance 5.6 mm, the modulation transfer function of middle wavelength is close to 0.7; the modulation transfer function of long wavelength is greater than 0.5; both are close to the diffraction limited curve. The system can meets the requirements of the overall design of the infrared scene simulator.

Key words: Projection optical system; Dual-band infrared; Hybrid refractive/diffractive; Coaxial sphere; Digital micro-mirror device

0 引言

根据普朗克黑体辐射定律, 红外成像中波长 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的红外中波主要用于观测高温物体; 波长 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 的红外长波用于探测常温物体轮廓. 文献

[1]中给出棕黑色粘土土壤和棕黑色沙土土壤的光谱, 从光谱图中可看出, 两种土壤在中波红外波段有相同的光谱特性, 而在长波红外波段有较大差异, 只有通过双波段测量才能将两种土壤区分开. 利用红外双波段探测军用红外目标, 可以接收两个波段的

基金项目: 总装“十二五”预研基金课题(No. 5131 $\times\times\times$ 103)资助

第一作者: 林丽娜(1986-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向是红外光学设计. Email: lina127975@163.com

导师(通讯作者): 王文生(1943-), 男, 教授, 主要研究方向为现代光学设计、现代光学测试技术. Email: wwsciom@163.com

收稿日期: 2013-04-25; 录用日期: 2013-07-16

信息,扩大了接收的信息量,也便于信息融合,提高了对目标的探测及识别能力,因而国际上提出了双波段成像系统的研究^[2-3]. 动态红外投影技术是红外成像测试与评估的关键技术,相比于传统红外景象模拟技术,基于数字微镜器件(Digital Micro-mirror Device, DMD)的红外景象模拟器具有高空间分辨率、高帧频、无死象元和均匀性好等特点,已逐渐成为红外目标成像模拟技术发展的主要方向^[4].

投影光学系统是动态红外图像模拟系统的最关键、难度最大的部分,决定着投影景象的逼真性能. 文献[5-6]设计了透射式红外长波投影光学系统,波段范围较窄,丢失部分信息;文献[7]设计的红外双波段景象投影光学系统,在 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段系统的分辨率只达到 $7\ \text{ly}/\text{mm}$,成像质量不能满足现代红外投影系统的要求;文献[8]设计了宽波段 DMD 动态投影光学系统,采用离轴三反射镜结构,工艺复杂,不宜装调且误差比较大. 文献[9]设计了红外双波段衍射混合光学系统,系统中使用了双层衍射光学元件,加工困难且成本较高,不易实现.

本文结合红外双波段光学系统的特点和用户需求,将衍射光学元件引入投影光学系统中,设计了用于动态红外景象模拟系统中的基于 DMD 的红外双波段投影光学系统. 系统采用共轴式,引用一个二元光学衍射面,使用三片球面透镜对红外双波段进行消色差. 系统具有结构简单、重量轻、易于装调和成像质量优良等特点,满足红外双波段景象模拟系统的用户要求.

1 DMD 动态红外景象模拟系统

模拟系统按照成像原理可以分为直接辐射型和辐射调制型两大类. 直接辐射型是指通过控制图像生成器的像元,利用其自身产生的辐射,通过调制其辐射强度产生红外图像,主要代表有:激光二极管阵列技术、电阻阵列技术、Bly Cell 技术等. 红外辐射调制型是利用计算机模拟红外目标与背景的信息,通过空间光调制技术,对红外光源提供的红外辐射进行空间强度调制,生成红外图像,主要代表有:液晶光阀技术、基于硅基液晶(Liquid Crystal on Silicon, LCOS)的空间光调制技术和基于 DMD 的红外模拟技术等^[10]. 相比于其它红外景象生成技术,基于 DMD 的红外景象模拟技术有诸多优点:

1) 高空间分辨率: DMD 器件利用微机械加工的制造工艺,微镜可以做得很小,像素分辨率就可以做到很大,目前已经能够做成 $2\ 048\times 1\ 152$ 阵列.

2) 高帧频:在二进制模式下, DMD 的像素单元用一位二进制数(0 或 1)来控制,可产生高帧频的图

像.

3) 均匀性好: DMD 器件中每个微镜面的面积约为 $16\times 16\ \mu\text{m}^2$,微镜面之间的间隔约为 $1\ \mu\text{m}$,因此微镜器件大约 90% 的面积都能有效地将反射光投射到屏幕上,空间均匀性好.

基于 DMD 的动态红外景象模拟系统由以下几部分构成:黑体光源、照明系统、投影棱镜、DMD 及其驱动电路、计算机图像生成器、投影光学系统等. 整个模拟系统如图 1 所示,由计算机图像生成器(Computer Image Generator, CIG)生成的图像数据,经过数字信号处理电路,送入 DMD 驱动电路,并将数据保存在存储单元. 黑体光源产生红外热辐射经过照明光学系统和投影棱镜后均匀照射 DMD,利用 DMD 反射调制入射的红外辐射;红外热辐射通过投影棱镜,输入到投影光学系统,被投影到被测单元的入瞳处. 使红外成像系统如同工作在真实的外场环境中,以达到评价红外成像系统性能的目的. DMD 器件工作波长主要受保护窗口透过率的限制,通过更换窗口^[11],可将工作波段扩展到红外中波和红外长波波段.

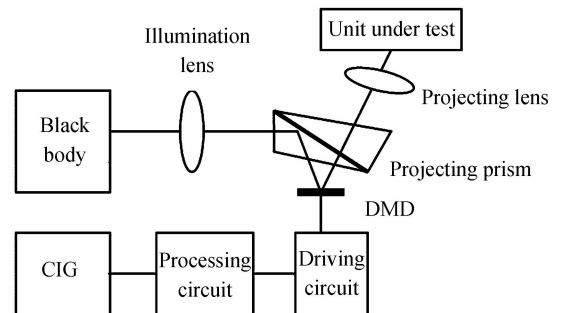


图 1 DMD 动态红外模拟系统

Fig. 1 Schematic sketch of dynamic infrared scene simulator based on DMD

2 光学系统指标参量

投影光学系统的指标要求与所选用的 DMD 和待测设备有关. 本系统选用德州仪器公司 XGA 格式 DMD,分辨率为 $1\ 024\ \text{pixel}\times 768\ \text{pixel}$,微镜尺寸为 $10.8\times 10.8\ \mu\text{m}^2$,微镜偏转角为 $\pm 12^\circ$. 待测设备探测器焦平面像元数为 320×240 ,像元尺寸为 $30\times 30\ \mu\text{m}^2$. 根据用户需求和所选用 DMD 确定投影光学系统的指标参量如表 1.

表 1 光学系统主要指标参量

Table 1 Main parameters of optical system

Spectral range/ μm	$3\sim 5, 8\sim 12$
Effective focal length/mm	150
F-number	$F/2$
Full field of view/ $^\circ$	5.3
Modulation transfer function $3\sim 5\ \mu\text{m}>0.6$; $8\sim 12\ \mu\text{m}>0.4$	

3 光学系统设计

3.1 结构型式选择

根据系统的工作原理可知,DMD芯片位于投影系统的物方焦平面上,出射光为平行光.设计时采用反向设计方法,即平行光入射,相当于无穷远物通过物镜成像,像面位于DMD位置处.投影系统出瞳与被测系统入瞳衔接,为保证误差容限,投影系统出瞳可稍大于被测系统入瞳.

对于红外光学系统,反射式光学系统的视场角较小,系统存在中心遮拦问题,并且其加工、装调等要求极高.折射式光学系统的同轴性好,装调相对比较简单.由于红外双波段系统的波长带较宽,双波段可选择的红外材料有限,要想达到好的成像效果,一是复杂化系统;二是使用特殊的光学材料或引入特殊的光学表面.目前,衍射元件在红外波段已经得到很成功的应用.在光学系统中使用衍射元件可使系统所需的光学元件减少,从而减少系统的体积和重量,实现小型化、轻量化的设计.由于红外材料较少且昂贵,对红外透射系统应使用尽可能简单的结构,减少使用透镜的片数.本文采用了共轴三片式折衍混合红外双波段投影系统的设计.

3.2 双波段消色差

二元光学元件是基于光波的衍射理论,在传统的光学元件表面上刻蚀产生两个或多个台阶深度的浮雕结构,形成纯相位、同轴再现、具有高衍射效率的一类光学元件^[12].二元光学元件的等效阿贝数和相对部分色散为

$$\nu = -\lambda_R / (\lambda_L - \lambda_S) \quad (1)$$

$$P = (\lambda_S - \lambda_R) / (\lambda_S - \lambda_L) \quad (2)$$

式中, λ_R 为参考波长, λ_S 和 λ_L 分别为工作波段的短波波段和长波波段.由式(1)、(2)可知,二元光学元件的色散性质由所用的波长决定,与基底材料无关.且其色散系数为负值,与常规材料色散系数正好相反,这对于单独应用的二元光学元件来说是个缺点,但是把它与常规折射面混合使用,光在材料中的色散与在位相轮廓上的色散具有相反的符号,折衍射混合的元件阿贝数为-很小负值,其等效折射元件光焦度略小于元件整体光焦度,等效衍射元件光焦度非常小,这样可以达到消色差的目的.并且折衍混合光学系统同时具有折射和衍射两种特性,使光学设计中的自由度得到了扩展,通过这样的设计不仅可以提高系统的成像质量还可以简化系统的结构.

由于本系统的视场角较小,只需考虑消除光学系统的位置色差,对两个波段同时消色差,需满足

$$\sum_1^k h_i \varphi_i = \varphi \quad (3)$$

$$\sum_1^k h_i^2 \frac{\varphi_{1i}}{\nu_{1i}} = 0 \quad (4)$$

$$\sum_1^k h_i^2 \frac{\varphi_{2i}}{\nu_{2i}} = 0 \quad (5)$$

式中, φ 为系统的总光焦度, k 是透镜总数目, h_i 为近轴光线在第 i 个透镜上的入射高, ν_{1i} 、 ν_{2i} 分别为第 i 个透镜在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段上的阿贝数, φ_{1i} 、 φ_{2i} 分别为第 i 个透镜在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段上的光焦度.由式(3)~(5)可知,欲满足总光焦度,并校正双波段色差,则需要至少三种具有不同色散系数的材料,在系统工作的红外双波段常用材料中,Ge的折射率和阿贝系数都较大,且具有较好的机械加工性能.ZnS和ZnSe的透过波段较宽,因此选用Ge、ZnS、ZnSe这三种材料.

3.3 像差设计

景象模拟系统中,投影棱镜位于DMD和投影光学系统之间,其工作原理是:来自黑体的热辐射经过红外双波段聚光镜,垂直入射到主棱镜入射面,以小于临界角的入射角入射到主棱镜的斜面,发生全反射,出射后照明DMD表面;由DMD表面反射后成为投影光束,投影光束经过主棱镜透射,再经补偿棱镜出射;主棱镜和补偿棱镜间有一空气层,与补偿棱镜组合后在投影光路中形成一平行平板.设计时用相同厚度的平行平板代替棱镜,因此在光学系统像面前加入一片材料为锗的平行平板,与透镜组一起像差平衡.由式(3)~(5)和设计经验得到系统的初始结构,然后利用光学设计软件ZEMA-X对初始结构进行优化.设计时采用多重结构的方法,将红外中波段和红外长波段同步优化,优化时为保证双波段工作共焦面,设定双波段具有共同的像距,并在共焦面位置处评价其像质;此投影系统相对孔径比较大、焦距中等、视场较小,重点校正球差和色差.分析系统各面像差贡献,把球差贡献比较大的表面的曲率半径进行同步变量优化,进行相互补偿;分析系统色差情况,在适当的地方引入二元衍射光学面,ZEMAX光学设计软件的旋转对称二元面的位相分布函数为^[13-14]

$$\varphi_{(r)} = A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + \dots \quad (6)$$

式中: r 为归一化的半径坐标; A_1 为二次相位系数,决定二元面的傍轴光焦度,实现光学系统的消色差; A_2 、 A_3 等为非球面相位系数,用于校正系统的高级像差,本次设计取了前三个系数为变量,通过反复优化,使得整个系统达到最佳成像质量;优化过程中尽量减小系统总长,使系统达到小型化.

4 设计结果与分析

最终优化得到的红外双波段折衍混合投影光学

系统结构如图 2. 光阑置于第一个透镜之前 10 mm 处, 以便使投影系统的出瞳与接收系统的入瞳衔接. 系统结构简单, 由三片透镜 (ZnSe、ZnS、Ge) 和一个投影棱镜 (Ge) 组成, 其中第五面 (第二片透镜后表面) 上引用了以球面为基底的衍射面 (衍射系数分别为: -353.688 、 229.328 、 -394.746), 采用 1 阶衍射, 透镜基底材料为 ZnS. 优化后的光学系统焦距为 150 mm, 后工作距离 5.6 mm, $F/\#$ 为 2, 全视场角为 5.3° , 系统总长为 197 mm, 满足用户的要求.

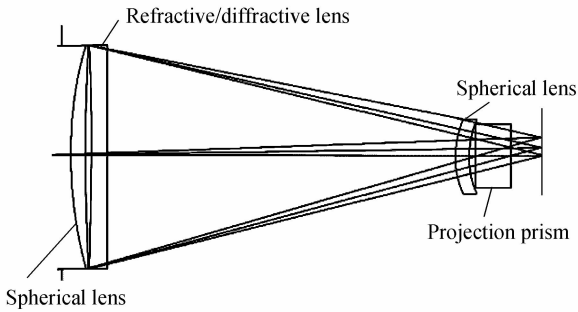
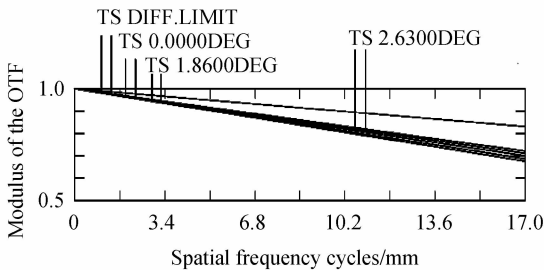


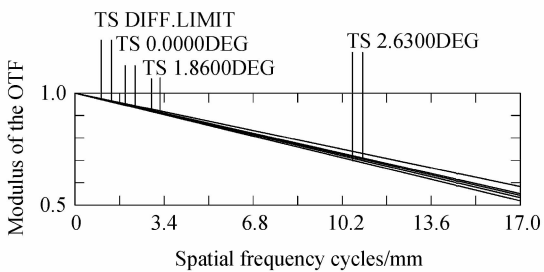
图 2 投影系统结构

Fig. 2 Sketch of the projection optical system

光学传递函数 (Optical Transfer Function, OTF) 由调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 和位相传递函数 (Phase Transfer Function, PTF) 组成. 位相传递函数一般不影响像的清晰度, 实际用得更多的是调制传递函数. 调制传递函数是光学系统的主要评价手段. 图 3(a) 和 (b) 分别是红外中波波段和红外长波波段的调制传递函数. 由于探测器的像元的尺寸为 $(30 \times 30) \mu\text{m}^2$, 对应的空间截止频率为 17 ly/mm. 由图 3 可以看出, 在截止频率 17 ly/mm, 像距 5.6 mm 处, $3 \sim 5 \mu\text{m}$



(a) 3~5 μm



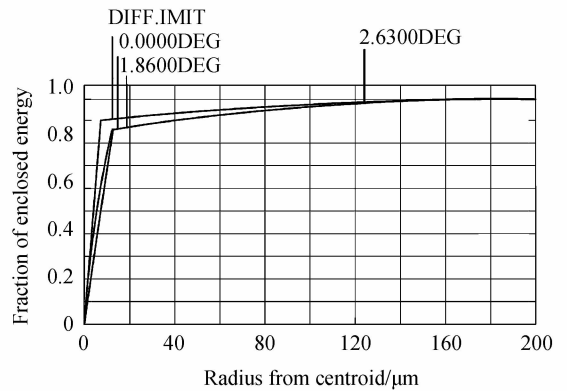
(b) 8~12 μm

图 3 不同波段调制传递函数

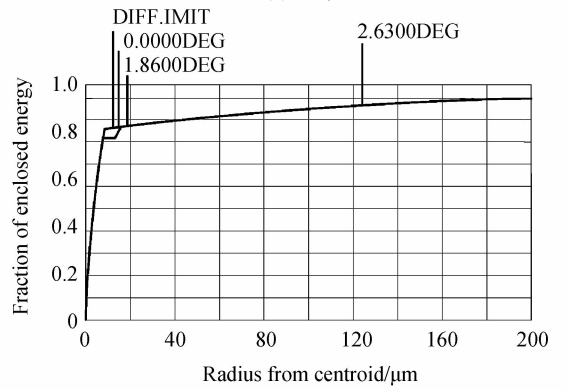
Fig. 3 MTF curves of different wave-bands

波段的 MTF 接近 0.7, $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段的 MTF 大于 0.5, 均超过技术指标要求, 接近衍射曲线.

图 4(a) 和 (b) 为系统在红外中波波段和红外长波波段的系统衍射能量曲线图. 由图可看出, 系统在 $10 \mu\text{m}$ 的像素尺寸内, 红外中波波段的各个视场系统能量接近 80%; 红外长波波段的各个视场系统能量接近 85%, 均满足探测器使用要求. 图 5 为系统中衍射面的位相及周期同径向距离的关系, 衍射面的线频率最大为 0.369 Periods/mm, 对应最小周期线宽为 2.712 mm, 可以用金刚石切削技术加工此衍射面.



(a) 3~5 μm



(b) 8~12 μm

图 4 红外中波和长波波段系统的衍射能量曲线

Fig. 4 Diffractive energy of 3~5 μm and 8~12 μm wave-bands system

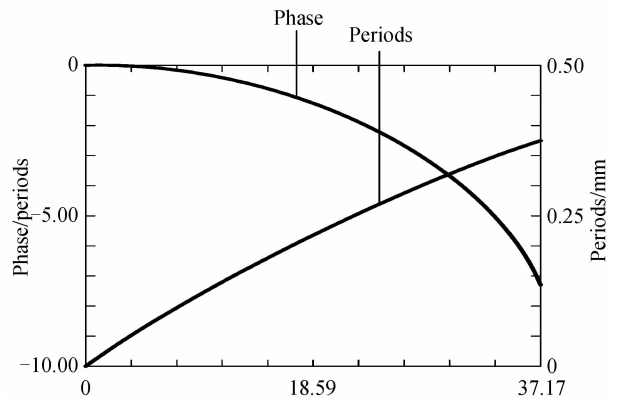


图 5 衍射面的位相及周期同径向距离的关系

Fig. 5 The relationship between phase and periods relative to radial distances of the diffractive surface

5 结论

本文针对动态红外景象模拟器的需求,设计了红外双波段共轴景象模拟投影光学系统. 系统结构简单,仅由三片球面透镜和一个投影棱镜组成,其中引入一个二元衍射面,使得系统更加轻量化,降低了材料成本,校正了双波段的色差,提高了系统的成像质量. 在截止频率 17 ly/mm,像距 5.6 mm 时,红外中波 MTF 接近 0.7,红外长波 MTF 大于 0.5. 该系统设计的总体参量和像质均满足基于 DMD 的红外双波段景象模拟系统的使用要求.

参考文献

- [1] A number of spectral libraries can be accessed from the Internet from the RSGS. The main web address is <http://speclab.cr.sugs.gov/spectral-lib.html>.
- [2] JAMIESON T H. Ultrawide waveband optics[J]. *Optical Engineering*, 1984, **23**(2): 111-116.
- [3] JIANG H, QIAN Y, RHEE K T. High speed dual spectral infrared imaging[J]. *Optical Engineering*, 19-93, **32**(6): 1281-1283.
- [4] BEASLEY D B, BENDER M, CROSBY J, *et al.* Dynamic IR scene projection based upon the digital micro-mirror device [C]. SPIE, 2001, **4366**: 96-102.
- [5] 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*, 2007, **27**(7): 1266-1270.
范长江, 王肇圻, 吴环宝, 等. 红外双波段双层谱衍射光学系统设计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1266-1270.
- [6] JIA Xin, LIAO Zhi-ie, XING Ting-wen, *et al.* Optical system design of dynamic infrared scene projector based on digital micro-mirror device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(4): 692-696.
- [7] ZHENG Ya-wei, GAO Jiao-bo, WANG Jun, *et al.* Design of the optical system for infrared dynamic scene simulator[J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(8): 577-579.
郑雅卫, 高教波, 王军, 等. 动态红外场景准直投射光学系统的设计[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(8): 577-579.
- [8] CHANG Hong, FAN Zhi-gang. Optical system design of DMD-based dual-band infrared scene projection[J]. *Harbin Institute of Technology*, 2007, **3**(5): 838-840.
常虹, 范志刚. 基于 DMD 的红外双波段景象投影光学系统设计[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, **3**(5): 838-840.
- [9] DANG Dong-ni, JI Yi-qun, SHEN Wei-ming. Projection lens design of wide band dynamic infrared scene simulator with digital micro-mirror device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(4): 1017-1021.
党东妮, 季轶群, 沈为民. 宽波段 DMD 动态红外景象仿真器投影光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(4): 1017-1021.
- [10] LI Zuo, QIAN Li-xun, LI Ping, *et al.* Technologies of dynamic infrared scene projection and its new development [J]. *Laser & Infrared*, 2011, **40**(3): 377-383.
李卓, 钱丽勋, 李平, 等. 动态红外场景生成技术及其新进展[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(3): 377-383.
- [11] GAO Jiao-bo, WAN Jun. Dynamic IR scene projector using the digital micro-mirror device [C]. SPIE, 2005, **5640**: 174.
- [12] 张以漠, *应用光学* (第 3 版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 485-493.
- [13] BIGWOOD C R. New infrared optical systems using diffractive optics [C]. SPIE, 2002, **4767**: 1-12.
- [14] FISCHER R E, TADIC-GALEB B, YODER P R. Optical system design [M]. New York: McGraw-Hill, 2000: 118-121.