

激光与光电子学进展

基于谐衍射理论的 0.40~2.50 μm 宽波段光学系统设计

王振东, 刘欢, 陈阳, 潘永强, 谢万鹏, 韩军*

西安工业大学兵器科学与技术学院, 陕西 西安 710021

摘要 基于谐衍射光学元件的负色散和消热差特性,设计了一种工作波段为 0.40~2.50 μm 的宽波段光学成像系统。建立了双层衍射光学元件带宽积分平均衍射效率的数学模型。运用 Matlab 软件确定衍射元件的最佳设计波长。采用 BaF_2 、 Al_2O_3 、 Al_2O_3 -E、普通光学玻璃(KZFSN5、SF57)设计了折衍混合 5 片式光学结构,并通过合理分配光焦度实现了宽波段共光路共焦面集成。实验结果表明,该系统的有效焦距为 100 mm,视场角为 9.4° , F 数为 2.8,在 $-40\sim 60^\circ\text{C}$ 范围内可实现无热化。在奈奎斯特频率 50 lp/mm 处,0.40~0.78 μm 波段的调制传递函数(MTF)均大于 0.6,0.78~2.50 μm 波段的 MTF 均大于 0.5。相比基于折射透镜的传统宽波段光学系统,该系统具有结构简单、尺寸小且成像质量接近衍射极限的优点。

关键词 光学设计; 谐衍射光学元件; 双层衍射; 宽波段

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1922002

Design of 0.40–2.50 μm Wide-Band Optical System Based on Harmonic Diffraction Theory

Wang Zhendong, Liu Huan, Chen Yang, Pan Yongqiang, Xie Wanpeng, Han Jun*

School of Armament Science and Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China

Abstract Based on the negative dispersion and heat dissipation characteristics of harmonic diffractive optical elements, a wide-band optical imaging system with operating band of 0.40–2.50 μm is designed in this paper. The mathematical model of the bandwidth integral average diffraction efficiency of the double-layer diffractive optical element is established. The optimum design wavelength of diffraction element is determined by Matlab software. BaF_2 , Al_2O_3 , Al_2O_3 -E and ordinary optical glass (KZFSN5, SF57) are used to design the refractive and diffractive hybrid 5-piece optical structure, and the wide-band common optical path confocal plane integration is realized by rational distribution of optical focal degree. Experimental results show that, the system has an effective focal length of 100 mm, the field angle of view is 9.4° , and the F -number is 2.8. The system achieves no thermo in the range of $-40\sim 60^\circ\text{C}$. At the Nyquist frequency of 50 lp/mm, the modulation transfer function (MTF) of 0.40–0.78 μm is greater than 0.6, and the MTF of 0.78–2.50 μm is greater than 0.5. Compared with the traditional wide-band optical system based on refractive lens, the system has the advantages of simple structure, small size and imaging quality close to the diffraction limit.

Key words optical design; harmonic diffraction optical element; double layer diffraction; wide-band

1 引言

随着应用环境的日益复杂以及各种侦察伪装技术水平的不断发展,目标探测和识别的难度也越来越高。单一波段系统获取的信息量有限,使探测识别目标的准确度降低,宽波段甚至多波段成像系统则能实现对更多目标信息的探测识别^[1-4]。可见光(VIS)系统具有

分辨率高、信息量大等优点,但其工作时需要充足的照明条件。在大气辉光的夜视条件下,短波红外夜视成像比可见光成像具有显著的先天优势,且短波红外成像受大气散射的影响小,透雾、霾、烟尘能力较强,具有良好的抗干扰能力。因此,将可见光系统与近红外(NIR)-短波红外(SWIR)系统相结合,不仅能实现全天候成像,还可以提高目标的识别率和观测效率。

收稿日期: 2021-09-13; 修回日期: 2021-09-22; 录用日期: 2021-09-27

基金项目: 陕西省重点研究开发项目(2019ZDLGY16-01)

通信作者: hanjun513@126.com

具有 0.40~2.50 μm 宽波段成像能力的探测器技术逐渐成熟,使可见光、近红外、短波红外共光路共焦面成像探测成为可能。传统纯折射型宽波段光学系统很难在整个波段同时进行高质量成像,必须依靠大色散的负透镜消除色差或使用不同透镜结构组合校正系统的轴向色差和球差,导致系统的透镜数目多、体积大、透过率较低。在光学系统中引入谐衍射光学元件(HDOE)可校正系统的像差。HDOE可以在一系列分离波长处获得相同的光焦度,其具有的良好复消色差特性和消热差特性使宽波段光学系统在不同衍射级衍射,实现谐振共焦成像。折衍混合式光学系统不仅能提高成像质量,还可以减小系统体积,使系统易于实现小型化,但现有的宽波段光学系统大多由多个独立系统组成,体积大且侦查设备整体结构复杂^[5]。李岩等^[6]设计了谐衍射红外双波段双视场光学系统,用5片透镜实现了双波段两档变焦,但该系统的工作波段为中波红外和长波红外波段,不能辨别目标信息的细节。杨亮亮等^[7]设计了工作在3.7~4.8 μm 和7.7~9.5 μm 红外波段的光学系统,用4片透镜实现了在-40~71 $^{\circ}\text{C}$ 范围内的无热化设计。杨洪涛等^[8]设计了折衍混合红外双波段变焦光学系统,通过切换反射镜改变光路实现变焦功能,但系统存在中心遮拦且体积较大。曲锐等^[9]设计了可见光-近红外波段的无热化连续变焦光学系统,可实现可见光和近红外双波段的共孔径共焦面集成,但该系统使用了16片透镜,质量较大。

针对上述问题,本文通过引入HDOE设计了0.40~2.50 μm 宽波段光学成像系统,在不采用补偿光路的情况下,通过组合双层HDOE和其他光学材料进行消色差、消热差设计,减少了透镜数量,实现了宽波段共光路共焦面成像。实验结果表明,相比基于折射透镜的传统宽波段光学系统,该系统具有结构简单、尺寸小、质量轻的优点。

2 基本原理

2.1 谐衍射理论

谐衍射透镜在相邻环带产生的相位差为 $2P\pi$,即相邻环带间的光程差为设计波长 λ_0 的 P 倍(P 为大于等于2的整数)。对于使用波长 λ 的 m 级次成像,焦距 $f(\lambda)=P\lambda_0 f_0/(m\lambda)$,即满足 $\lambda=P\lambda_0/m$ 的一系列谐振波长,谐衍射透镜的焦距相同,从而将光束会聚到共同的焦点 f_0 处。在这些分立的波长处,光学系统的理论衍射效率达到100%^[10]。通过设计相位深度因子 P ,在一定光谱范围内可将一部分波长的光会聚到一个焦平面上。图1(a)和图1(b)分别为单层HDOE、双层HDOE的结构。

双层HDOE既能保留单层HDOE的成像特点,还能在宽波段范围内获得较高的衍射效率,且其偏离设计波长时的衍射效率下降缓慢。为了在多个设计波长处实现100%的衍射效率,双层HDOE的相位分布函

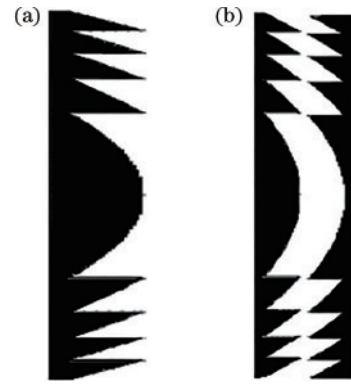


图1 HDOE的结构。(a)单层HDOE;(b)双层HDOE
Fig. 1 Structure of the HDOE. (a) Single-layer HDOE;
(b) double-layer HDOE

数必须满足

$$\varphi(\lambda_{oi}) = \sum_{x=1}^N k_{oi} [n_x(\lambda_{oi}) - n'_x(\lambda_{oi})] d_x, \quad (1)$$

式中: k_{oi} 为波数; N 为HDOE的层数; $n_x(\lambda_{oi})$ 为第 x 层HDOE材料在波长 λ_{oi} 处的折射率; $n'_x(\lambda_{oi})$ 为与第 x 层HDOE密切接触的不同介质在波长 λ_{oi} 处的折射率; d_x 为双层HDOE结构的高度。确定双层HDOE的两种基底材料后,就能计算出衍射微结构的高度 d_1 、 d_2 ,此时,双层HDOE的衍射效率^[11]可表示为

$$\eta_m = \text{sinc}^2 \left\{ m - \frac{[n_1(\lambda) - 1]d_1 - [n_2(\lambda) - 1]d_2}{\lambda} \right\}, \quad (2)$$

式中: m 为衍射级次; $n_1(\lambda)$ 与 $n_2(\lambda)$ 分别为两种基底材料的折射率。

2.2 宽波段光学系统的设计原理

基于HDOE独特的负色散特性和消热差特性,在折射式光学系统中引入HDOE可实现0.40~2.50 μm 宽波段共焦面成像。衍射光学元件的色差由微结构对波长的衍射引起,其色差特性与折射光学元件正好相反。衍射光学元件的等效阿贝数可表示为

$$V = \frac{\lambda_M}{\lambda_s - \lambda_L}, \quad (3)$$

式中, λ_s 、 λ_M 、 λ_L 分别为设计波段内的最小波长、中心波长、最大波长。在0.40~2.50 μm 宽波段内,衍射元件的等效阿贝数均为负值,与常规材料的色散系数符号相反,因此,可通过折射、衍射元件的组合实现消色差。

光学系统中由温度变化引起的离焦也称为热差^[12]。折射光学元件的光热膨胀系数可表示为

$$x_{t,x} = \alpha_g - \frac{1}{n - n_0} \left(\frac{dn}{dT} - n \frac{dn_0}{dT} \right), \quad (4)$$

HDOE的光热膨胀系数可表示为

$$x_{t,d} = 2\alpha_g + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT}, \quad (5)$$

式中: α_g 为材料的线膨胀系数; n 和 n_0 分别为透镜材料和介质的折射率; dn/dT 为透镜材料的折射率温度系

数。可以发现:折射元件的光热膨胀系数 $x_{i,x}$ 为负,与材料的折射率和膨胀系数有关;HDOE 的光热膨胀系数 $x_{i,d}$ 始终为正,只与基底材料的线膨胀系数有关,与材料的折射率无关。通过合理分配光焦度,可以保证系统的消色差。光学系统设计必须同时满足光焦度、消色差和消热差方程,可表示为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n h_i \varphi_i = \varphi \\ \left(\frac{1}{h_1 \varphi}\right)^2 \sum_{i=1}^n (h_i^2 \omega_i \varphi_i) = 0 \\ \left(\frac{1}{h_1 \varphi}\right)^2 \sum_{i=1}^n (h_i^2 x_i \varphi_i) = \alpha_n L \end{cases}, \quad (6)$$

式中: h_i 为第一近轴光线在第 i 个透镜表面的入射高度; φ_i 为第 i 个透镜的光焦度; φ 为光学系统的总光焦度; ω_i 为光学元件的色散因子; x_i 为第 i 个透镜的光热膨胀系数; α_n 为光学系统外部机械结构的线膨胀系数; L 为系统机械结构的长度。

3 设计实例

设计实例选用 0.40~2.50 μm 宽波段焦平面探测器,像元数为 1280×1024,单个像元的尺寸为 10 μm ×10 μm ,对角线长度为 16.39 mm,工作温度范围为 -40~60 $^{\circ}\text{C}$,镜筒材料选用铝合金材料。系统设计指标如表 1 所示。

宽波段共光路共焦面的光学系统主要有反射式、折射式、折反射式、折衍混合式四种光学形式。其中:

表 1 光学系统的设计指标

Table 1 Design index of the optical system

Parameter	Value
Wavelength / μm	0.40-0.78, 0.78-2.50
Detector specifications	1280×1024
Pixel size / (μm × μm)	10×10
Focal length / mm	100
Field of view / ($^{\circ}$)	9.4×9.4
F-number	2.8
Range of action / m	1000
Temperature range / $^{\circ}\text{C}$	-40-60

反射式系统的视场较小,通常在 1°以内;折反射式光学系统存在中心遮拦,对口径内的能量利用率和像点光能集中度都有很大影响,且会降低中、低频的调制传递函数(MTF)值;折射式光学系统校正宽波段产生的色差时,容易导致系统结构复杂、质量大。参考几种结构形式的优缺点,为实现宽波段光学系统小型化、轻量化的要求,采用折衍混合结构设计所需的光学系统。

3.1 双层衍射光学元件的设计

制作双层 HDOE 的两种材料必须是高折射率低色散和低折射率高色散材料的组合。考虑到宽波段光学衍射面的可加工性,选取氟化钙(CaF_2)、蓝宝石晶体(Al_2O_3)、氟化钡(BaF_2)、多光谱硫化锌(ZnS Broad)作为双层 HDOE 的基底材料组合^[13],宽波段光学系统的带宽积分平均衍射效率可表示为

$$\eta_m = \frac{0.5}{\lambda_{1\max} - \lambda_{1\min}} \int_{\lambda_{1\min}}^{\lambda_{1\max}} \text{sinc}^2 \left\{ m - \frac{[n_1(\lambda) - 1]d_1 - [n_2(\lambda) - 1]d_2}{\lambda} \right\} d\lambda + \frac{0.5}{\lambda_{2\max} - \lambda_{2\min}} \int_{\lambda_{2\min}}^{\lambda_{2\max}} \text{sinc}^2 \left\{ m - \frac{[n_1(\lambda) - 1]d_1 - [n_2(\lambda) - 1]d_2}{\lambda} \right\} d\lambda, \quad (7)$$

式中: $\lambda_{1\max}$ 和 $\lambda_{1\min}$ 、 $\lambda_{2\max}$ 和 $\lambda_{2\min}$ 分别为 0.40~0.78 μm 、0.78~2.50 μm 波段内的最大波长和最小波长。通过 Matlab 软件对不同材料组合的衍射效率进行分析后,选择 $\text{BaF}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 为双层衍射面的基底材料。

双层衍射结构中,不同设计波长对应不同的带宽积分平均衍射效率。对式(7)取最大值,并用 Matlab 软件找出衍射效率最大值对应的最佳设计波长,结果如图 2 所示。可以发现,设计波长 $\lambda_1=0.59 \mu\text{m}$ 和 $\lambda_2=1.86 \mu\text{m}$ 时,带宽积分平均衍射效率最大,为 97.9%。将设计波长代入式(1)得到双层 HDOE 微结构的高度 $d_1=170.10 \mu\text{m}$ 、 $d_2=104.32 \mu\text{m}$ 。图 3 为双层 HDOE 的衍射效率曲线。可以发现,0.40~2.50 μm 波段内的衍射效率在 88% 以上。

设计的初始光学系统采用折衍混合式结构。为了使光学系统在整个波段内具有较高的透过率,采用直

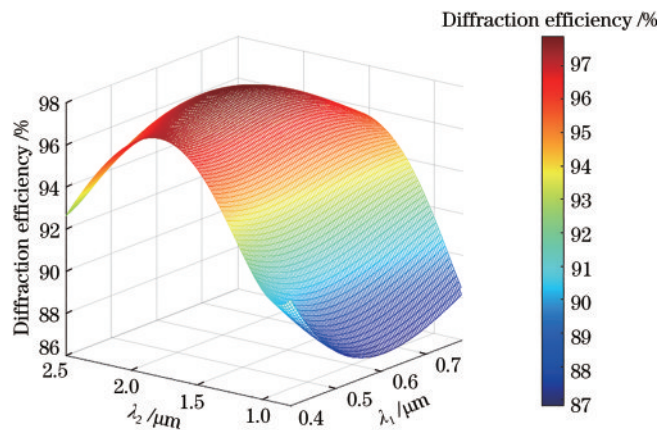


图 2 不同波长下双层 HDOE 的带宽积分平均衍射效率
Fig. 2 Bandwidth-integrated average diffraction efficiency of double-layer HDOE at different wavelengths

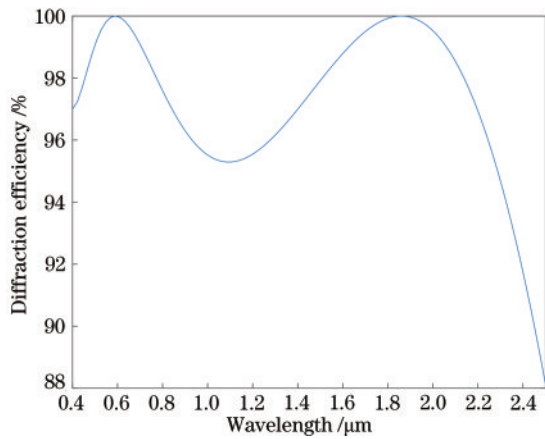


图 3 双层HDOE的衍射效率曲线

Fig. 3 Diffraction efficiency curve of double-layer HDOE

筒型一次成像系统构型,光学系统由5片透镜组成,所有元件均布置在同一光轴上,0.40~2.50 μm波段共用所有光路,具有工作波段宽、结构紧凑、适装性好等特点。为了在宽波段范围内校正系统的色差及其他像差,系统前组采用双层HDOE,后组则放置1片负透镜。衍射面在系统中承担的光焦度较小,因此先假定衍射面的光焦度为0,计算出5片透镜的光焦度,确定光学系统的初始结构,然后将衍射面加入系统中后用HDOE的负色散特性以及消色差特性校正系统的色差和其余像差。孔径光阑位于透镜组第1个面,以减少系统口径。前组将BaF₂透镜的后表面和AL₂O₃透镜的前表面设置为衍射面,构成双层HDOE结构,利用衍射光学元件的负色散特性校正第1片正透镜的色

差。中间固定组主要用于校正系统球差、慧差、像散和位置色差。后组采用负透镜校正系统残余场曲、畸变等像差,以保证系统的成像质量。系统结构的材料依次为BaF₂、AL₂O₃、AL₂O₃-E、普通光学玻璃(KZFSN5、SF57),镜筒材料选择常见的铝合金,热膨胀系数为23.6×10⁻⁶/°C,光学系统的后截距为14.897 mm,系统靠近物面一侧表面至焦面的距离为106.418 mm,系统总长与焦距的比为1.06。通过ZEMAX软件反复优化得到的光学系统结构如图4所示。

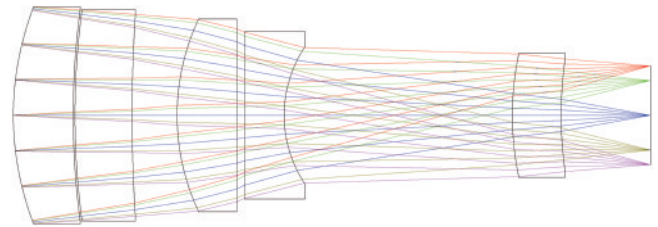


图 4 光学系统的结构

Fig. 4 Structure of the optical system

3.2 像质分析

MTF和点列图(Spot diagram)是评价光学系统像质的主要方式。光束通过光学成像系统会聚成一个弥散斑,通常要求弥散斑的均方根值(RMS)小于探测器的单个像元尺寸,否则会导致图像模糊。图5(a)、图5(b)分别为系统在不同波段的MTF曲线。可以发现,在奈奎斯特频率50 lp/mm处,0.40~0.78 μm波段的MTF均大于0.6,0.78~2.50 μm的MTF均大于0.5,成像质量接近衍射极限。

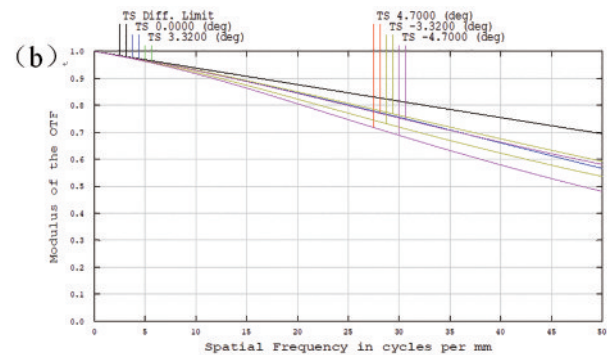
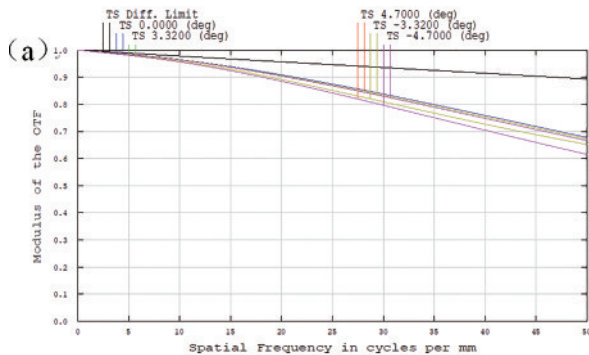


图 5 系统的MTF曲线。(a) 0.40~0.78 μm;(b) 0.78~2.50 μm

Fig. 5 MTF curve of the system. (a) 0.40~0.78 μm;(b) 0.78~2.50 μm

光学系统在常温条件下的弥散斑半径RMS如图6所示。可以发现,0.40~0.78 μm波段所有视场成像弥散斑半径的RMS最大为5.155 μm,0.78~2.50 μm波段弥散斑半径的RMS最大为7.615 μm,在单个像元(像元尺寸为10 μm)内满足系统的成像质量要求。

畸变指物体通过镜头成像时,实际像面与理想像面间产生的形变会影响系统的成像效果,光学设计时需将畸变控制在合理范围内。图7(a)、图7(b)分别为0.40~0.78 μm和0.78~2.50 μm两个波段的场曲与

畸变曲线图。可以发现:0.40~0.78 μm波段的最大场曲小于0.002 mm,最大畸变小于0.2567%;0.78~2.50 μm波段的最大场曲小于0.005 mm,最大畸变小于0.2526%;全视场范围内畸变均小于2%,满足使用要求。

衍射/几何能量曲线可以分析相对于像点中心,在不同半径下包含的各色光、各视场的能量百分比。0.40~2.50 μm波段的能量分布曲线如图8所示。可以发现,在10 μm半径范围内:0.40~0.78 μm波段各

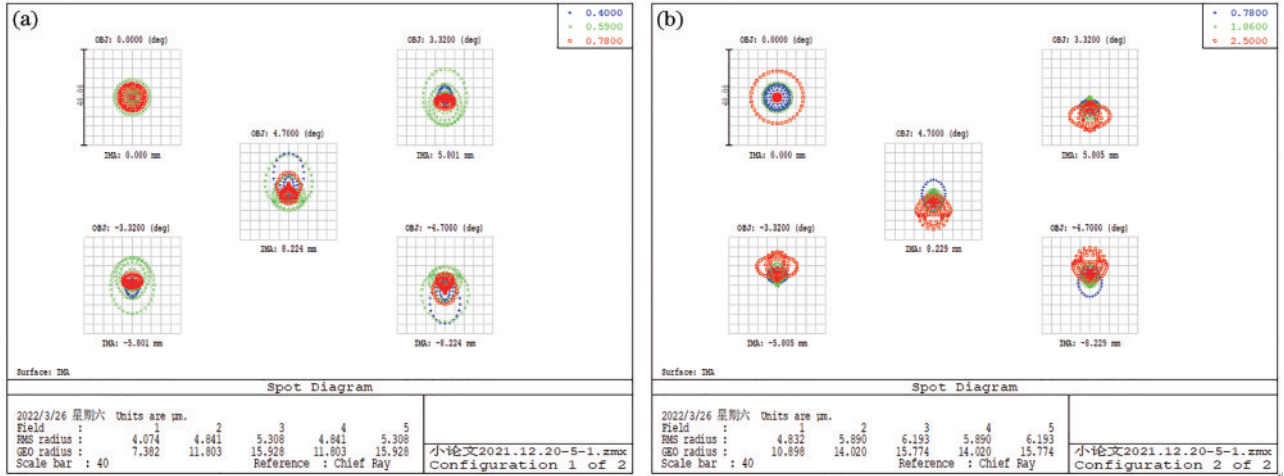


图 6 常温条件下系统的 RMS 点列图。(a) 0.40~0.78 μm; (b) 0.78~2.50 μm

Fig. 6 RMS spot diagram of the system under normal temperature conditions. (a) 0.40~0.78 μm; (b) 0.78~2.50 μm

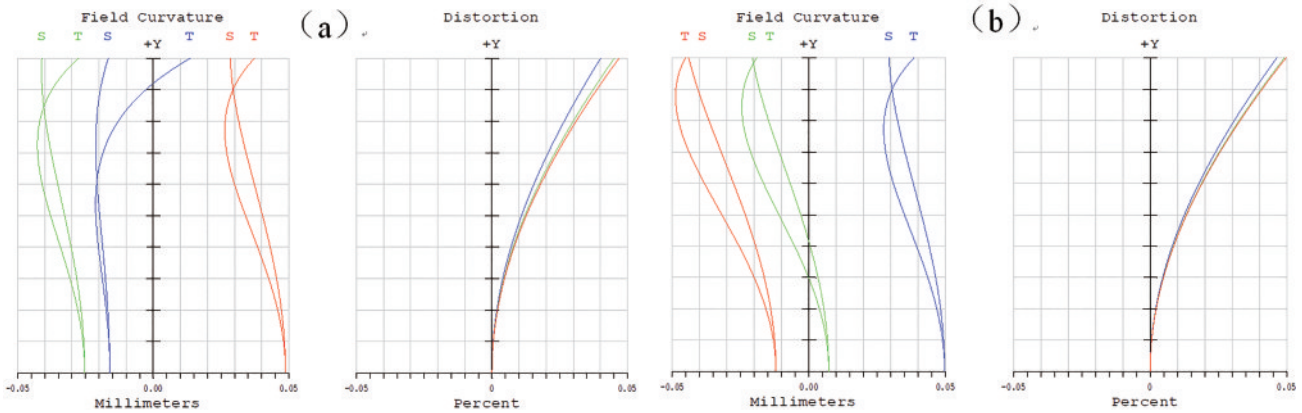


图 7 光学系统的场曲和畸变。(a) 0.40~0.78 μm; (b) 0.78~2.50 μm

Fig. 7 Field curvature and distortion of the optical system. (a) 0.40~0.78 μm; (b) 0.78~2.50 μm

视场的衍射能量均大于 93%; 0.78~2.50 μm 波段各视场的衍射能量均大于 86%。在不同环境温度下的

测试结果表明,像元接收到的能量比较集中,全视场下的衍射能量非常接近衍射极限。

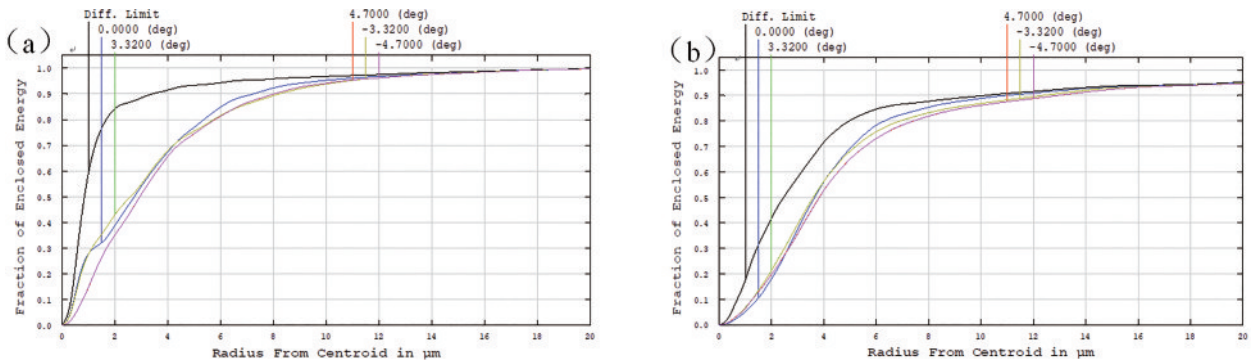


图 8 不同波段的能量图。(a) 0.40~0.78 μm; (b) 0.78~2.50 μm

Fig. 8 Energy diagrams of different bands. (a) 0.40~0.78 μm; (b) 0.78~2.50 μm

3.3 工程可行性分析

3.3.1 光学系统设计的公差分析

公差分析是为光机零件加工和组部件装调提供精度控制参考值,直接关系到光学系统的成像质量和生产成本。按照经验及实际工艺水平得到光学系统的设

计公差如表 2 所示。利用 ZEMAX 软件中的公差分析功能,以奈奎斯特频率 50 lp/mm 处系统的 MTF 作为评价标准,得到 100 次蒙特卡罗的分析结果如表 3 所示。可以发现,光学系统的 MTF 包围衍射均值在 80% 的概率下,0.40~0.78 μm 波段 MTF 可达到

表 2 光学系统的公差
Table 2 Tolerances of optical system

Surface tolerances		Element tolerances		Index tolerances	
Parameter	Tolerances	Parameter	Tolerances	Parameter	Tolerances
Fringes	3	Decenter (X, Y)	0.03	Index	0.001
Thickness /mm	0.03	Tilt (X, Y)	1'	Abbe /%	1
Decenter (X, Y)	0.03	—	—	—	—
Tilt (X, Y)	1'	—	—	—	—

表 3 蒙特卡罗方法的分析结果
Fig. 3 Analysis results of the Monte Carlo method

Probability /%	MTF at 50 lp/mm	
	0.40~0.78 μm	0.78~2.50 μm
90	0.44246970	0.28142165
80	0.47657467	0.30853115
50	0.57365144	0.38551730
20	0.64730762	0.48560952
10	0.68271934	0.52197625

0.47, 0.78~2.50 μm 波段 MTF 可达到 0.30, 满足成像质量要求, 验证了该系统具有较好的容差特性。

3.3.2 光学系统衍射面的加工分析

衍射面的相位周期和径向距离的关系如图 9 所示。可以发现, 每个衍射面共计 72 个环带, 在半径为

17.73 mm 附近相位周期值最大, 为 8 period/mm, 最小周期线宽为 125 μm , 考虑到衍射效率的大小, 将量化台阶数按 8 台阶进行设计, 此时最小特征线宽为 15.7 μm , 符合单点金刚石车削的加工条件。

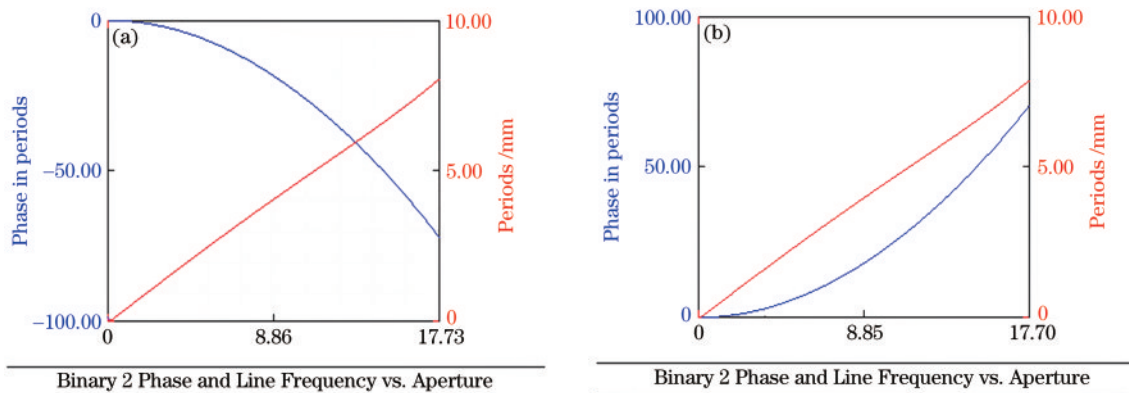


图 9 二元衍射面的相位曲线图。(a)第一层衍射面;(b)第二层衍射面

Fig. 9 Phase diagram of binary diffraction surface. (a) First diffraction plane; (b) second diffraction plane

4 结 论

基于衍射光学理论, 利用 HDOE 特殊的色散原理和热特性, 将 HDOE 应用于 0.40~2.50 μm 宽波段光学成像系统中。理论分析了双层衍射带宽积分平均衍射效率, 经 Matlab 软件仿真计算了宽波段范围内衍射效率的最大值, 并根据计算结果选取最佳的设计波长。设计了一种采用铝合金镜筒和常用光学材料的 5 片式结构, 实现了可见光、近红外和短波红外波段的共孔径共焦面集成, 提高了探测目标信息的准确度。其中, 系统光路的尺寸为 110 mm×40 mm, 在奈奎斯特频率 50 lp/mm 下, 0.40~0.78 μm 波段的 MTF 值大于 0.6,

0.78~2.50 μm 波段的 MTF 值大于 0.5, 且工作波段范围内 MTF 曲线接近衍射极限, 各视场成像质量好。该系统结构紧凑、透镜数量少, 透过率高, 全温度范围内都具有较好的成像质量, 在全天候侦查和观测以及图像融合等领域都具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 许永森, 田海英, 惠守文, 等. 国外传输型航空相机的发展现状与展望[J]. 光机电信息, 2010, 27(12): 38-43.
Xu Y S, Tian H Y, Hui S W, et al. Trend and development actuality of the real-time transmission airborne reconnaissance camera[J]. OME Information, 2010, 27(12): 38-43.

- [2] 薛丹. 光电侦察平台的技术发展概况和发展趋势综述[J]. 教练机, 2011(3): 42-46.
Xue D. Technical development and trend of electro-optical reconnaissance platform[J]. Trainer, 2011(3): 42-46.
- [3] 李波, 孙崇尚, 田大鹏, 等. 国外航空侦察相机的发展情况[J]. 现代科学仪器, 2013(2): 24-27.
Li B, Sun C S, Tian D P, et al. Developments of foreign airborne reconnaissance camera[J]. Modern Scientific Instruments, 2013(2): 24-27.
- [4] 李永昆, 林招荣, 张绪国. 国外远距斜视航空相机发展概况[J]. 航天返回与遥感, 2017, 38(6): 11-18.
Li Y K, Lin Z R, Zhang X G. Development survey of foreign aerial cameras for distant oblique reconnaissance [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2017, 38(6): 11-18.
- [5] 程志峰, 刘福贺, 荀显超. 双波段共口径成像系统光机设计与分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3366-3372.
Cheng Z F, Liu F H, Xun X C. Opto-mechanical design and analysis of dual-band sharing aperture imaging system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(11): 3366-3372.
- [6] 李岩, 张葆, 洪永丰, 等. 谐衍射红外双波段双视场光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1122001.
Li Y, Zhang B, Hong Y F, et al. Optical design of harmonic diffractive infrared dual-band and dual-field system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1122001.
- [7] 杨亮亮, 沈法华, 刘成林, 等. 含有双层衍射光学元件的红外双波段无热化光学系统的设计[J]. 红外技术, 2019, 41(8): 699-704.
Yang L L, Shen F H, Liu C L, et al. Athermal design of infrared dual-band optical system with double-layer diffractive optical elements[J]. Infrared Technology, 2019, 41(8): 699-704.
- [8] 杨洪涛, 杨晓帆, 梅超, 等. 折衍混合红外双波段变焦光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(10): IRLA20200036.
Yang H T, Yang X F, Mei C, et al. Design of hybrid refractive-diffractive infrared dual-band zoom optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(10): IRLA20200036.
- [9] 曲锐, 郭惠楠, 曹剑中, 等. 可见-近红外无热化连续变焦光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(9): IRLA20210090.
Qu R, Guo H N, Cao J Z, et al. Design of visible-near infrared athermal continuous zoom optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(9): IRLA20210090.
- [10] 巩畅畅, 刘鑫, 范斌, 等. 基于 RGB 三波段的消色差衍射透镜设计与分析[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1105001.
Gong C C, Liu X, Fan B, et al. Design and analysis of diffractive achromats based on RGB three-band[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1105001.
- [11] 杨明亮, 赵勇兵, 陈凤, 袁得银. 含有双层衍射光学元件的中波/长波消色差光学系统的设计[J]. 应用光学, 2019, 40(5): 756-762.
Yang L L, Zhao Y B, Chen F, et al. Design of athermal MWIR/LWIR optical system with double-layer diffractive optical elements[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(5): 756-762.
- [12] 张发平, 张华卫. 基于二元衍射面的长波无热化光学系统设计[J]. 红外技术, 2020, 42(1): 25-29.
Zhang F P, Zhang H W. Design of long-wave athermal optical system based on binary diffraction surface[J]. Infrared Technology, 2020, 42(1): 25-29.
- [13] 张博, 崔庆丰, 朴明旭, 等. 双波段多层衍射光学元件的基底材料选择方法研究及其在变焦系统中的应用[J]. 光学学报, 2020, 40(6): 0605001.
Zhang B, Cui Q F, Piao M X, et al. Substrate material selection method for dual-band multilayer diffractive optical elements and its application in the zoom system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0605001.