

红外双波段共焦复合孔径光学系统设计

党更明, 高明*, 范晨, 陈阳

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 为满足光电成像装备多元、广域、远距离探测的需求,提出了双波段复合孔径光学系统的概念。采用主副孔径配合探测搜索的方式,其中主孔径用于远距离探测,副孔径用于大视场搜索,并分析主副孔径与中继系统拼接函数以推导复合孔径共焦面方程,从而保证不同波段图像采集的同步性和一致性。设计的红外双波段复合孔径光学系统成像波段为 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 和 $7.7\sim 9.5\ \mu\text{m}$,复合孔径系统由 5 个子眼(1 个主子眼和 4 个副子眼)构成,主孔径焦距为 200 mm、视场角均为 $\pm 6^\circ$,副孔径焦距为 50 mm、视场角均为 $\pm 12^\circ$,主副孔径光轴夹角为 6° ,合并后的总视场为 24° 。相对于均一型复合孔径系统而言,该系统兼具了远距离探测与大视场搜索功能,主副孔径系统与中继接收系统成像质量良好,在 $-40\sim 60\ ^\circ\text{C}$ 温度范围内无热差影响。

关键词 光学设计; 红外双波段; 复合孔径; 共焦

中图分类号 O439 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221905

1 引言

随着光电对抗技术的博弈和发展,其对光学系统的要求越来越高。在期望光学系统具备广域搜索能力的同时,还要求其能够对目标进行远距离成像探测^[1]。在传统光电侦察装备中,光学系统采用单孔径成像结构,长焦系统分辨率高,探测距离远,但存在探测视场角小的问题,故难以在广泛区域内展开实时搜索,而广角相机的焦距通常较短,分辨率较低,进而不适用于目标远距离探测、识别领域。因此,传统的单口径光电成像装备难以满足未来多元、广域、远距离探测的需求^[2]。为解决该问题,复合孔径成像系统被提出,此类系统采用多个孔径复合的结构形式,通过多孔径的视场叠加来实现大视场范围内的高清成像。

Law 等^[3]设计了一款高分辨率地基天文望远镜 Evryscope,其共由 24 个望远子系统构成,每个子系统的通光口径为 61 mm,焦距为 85 mm, F 数为 1.4,可以对 $384^\circ\times 384^\circ$ 区域进行成像。Karimzadeh 等^[4]对复眼系统进行了新型凹面与平面重叠型的设计,实现了小体积和高分辨率成像。张家铭等^[5]基于蜂窝状结构,设计了一款大视场并列型仿生复眼光学系统,该复眼由 3481 个紧密拼接的正六边形微透镜构成,单个微透镜视场为 4° ,整个系统视场角为 123.7° 。苏鹏程等^[6]也基于此种结构,设计了一种六边形紧密拼接形式的曲面微透镜阵列仿生复眼系统,其系统口径为

8.66 mm、视场角为 121° ,子眼的口径为 $500\ \mu\text{m}$ 、视场角为 6° 。王元元等^[7]设计了一种紧凑型大视场仿生复眼系统,子眼口径为 3 mm,并根据圆周式排布模型排布了 117 个子眼,总视场角为 120° 。李晓蕾等^[8]也对此进行了相应的研究,实现了一种可接收可见、中波红外双波段的大孔径仿生复眼光学系统,该复眼由 37 个子眼组成,子眼焦距为 30 mm、视场角为 20° ,总的视场角为 116° 。相对于微透镜阵列式的复眼系统而言,该曲面仿生复眼系统探测距离更远、获取目标信息更全。

与传统常见的均一型复眼光学系统相比,所设计的红外双波段复合孔径光学系统的子孔径系统参数并不相同,其中主孔径子系统焦距长、孔径大而视场较小,副孔径子系统焦距较短、口径较小而视场较大,利用大视场副孔径子系统进行广域搜索,利用长焦距主孔径子系统实现远距离探测,最终通过主副孔径配合实现广域、远距离探测。目前传统复眼光学系统多采用单波段成像,无法对目标进行全天候的探测。所设计的系统的主副孔径子系统均采用红外双波段共光路成像,相对于单波段复眼光学系统,解决了成像光谱范围较窄的问题,增强了获取目标多元信息的能力。

2 复合孔径系统原理及结构

2.1 复合孔径设计理论

复合孔径成像将各个子孔径所成的多幅图像拼接在一起,最终获得了一幅具有大视场的完整图像。其

收稿日期: 2022-10-31; 修回日期: 2022-12-02; 录用日期: 2022-12-27; 网络首发日期: 2023-01-06

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2019JM-470)、陕西省教育厅科研计划(18JS048)

通信作者: *minggao1964@163.com

中,边缘与中心子孔径视场角、相邻子孔径光轴间夹角决定了复合孔径系统的总视场角大小,故分析子孔径视场角与相邻子孔径光轴间夹角和复合孔径总视场角的关系是确定子孔径参数与排布方式的关键。

在所提复合孔径系统中,将中心子孔径设计为长焦系统,以实现较远距离目标的高分辨识别,并将边缘子孔径设计为大视场系统,以实现大视场范围目标的探测。以所提系统为例,建立视场拼接数学模型,如图 1 所示。

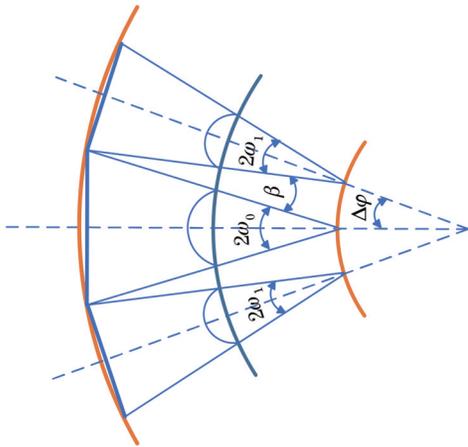


图 1 复合孔径系统视场拼接原理图

Fig. 1 Schematic diagram of field of view mosaic of composite aperture system

图 1 中以三组元复合孔径系统视场拼接为例,通过定义纵向子眼数目 Z 来表征复合孔径系统的成像通道数量。 $Z=3$ 表示该系统包含一个中心子孔径光学系统和两个边缘子光学系统, $\Delta\varphi$ 为相邻子孔径光轴间的夹角,中心子孔径视场角为 $2\omega_0$,边缘子孔径视场角为 $2\omega_1$ 。假设中心与边缘子孔径是紧密排布的,即机械间隔可忽略,则由图 1 可知,相邻两子孔径边缘光线平行,此时是视场拼接的临界条件,则有

$$\omega_0 + \omega_1 = \Delta\varphi. \quad (1)$$

在实际生产加工中,相邻子孔径间一定存在部分机械间隔,以起到支撑子孔径光学系统的作用,故若将子孔径间机械结构考虑进去,则有

$$\omega_0 + \omega_1 \geq \Delta\varphi, \quad (2)$$

则复合孔径系统总视场角 $2W$ 与相邻子孔径光轴间夹角和子孔径视场角的关系为

$$2W = 2\Delta\varphi + 2\omega_1. \quad (3)$$

设相邻子孔径边缘光线夹角为 β ,则有几何关系

$$\beta = \omega_0 + \omega_1 - \Delta\varphi. \quad (4)$$

设 P 为相邻子孔径间的机械间隔, d 为相邻子孔径视场重合起点位置到复合孔径系统的距离,此时 β 可以表示为

$$\tan\beta = \frac{P}{d} = \frac{D}{L-s}, \quad (5)$$

式中: D 为相邻子孔径物方重合线视场宽度; L 为复合孔径系统的工作距离; s 为相邻子孔径视场重叠起始位置与复合孔径系统的距离。

根据以上关系可知,相邻子孔径系统在 $s \sim L$ 的工作范围内可实现视场范围内无盲区。曲面球壳基底排布的子孔径为非均一型,即中心和边缘子孔径光学参数不相同,取复合孔径系统某个主阵列方向的子孔径作为研究对象加以分析,如图 2 所示。

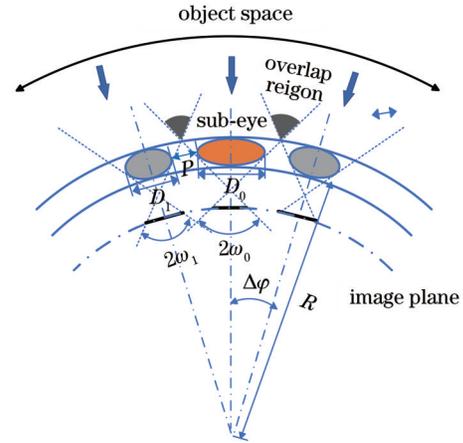


图 2 某主阵列子孔径排布剖面图

Fig. 2 Cross-sectional view of sub-aperture arrangement of main array

设复合孔径主阵列方向总视场为 $2W$,中心子孔径口径大小为 D_0 ,边缘子孔径口径大小为 D_1 。当子孔径光轴间夹角 $\Delta\varphi$ 较小时,夹角 $\Delta\varphi$ 和基底半径 R 之间近似满足

$$\tan \Delta\varphi = \frac{D_0 + D_1 + 2P}{2R}. \quad (6)$$

依据设计指标要求,中心子孔径口径 D_0 取 50 mm、边缘子孔径口径 D_1 取 14 mm、相邻子孔径间隔 P 取 6 mm,复合孔径系统的基本设计参数还需满足

$$\begin{cases} 2W \geq 22^\circ \\ 2\omega_0 \geq 6^\circ \\ 2\omega_1 \geq 12^\circ \end{cases}. \quad (7)$$

根据上述相关理论的推导,可以得到复合孔径光学系统结构图,如图 3 所示。

根据式(2)~(7)可以得到复合孔径光学系统的基本参数,如表 1 所示。

2.2 双波段共焦、共像面条件

由于设计的复合孔径系统包含中波和长波红外两个波段,故为保证双波段均清晰成像,要求两者的像面位置相同。此外,为实现两个波段对准同一目标探测,要求两者焦距相同。然而,当成像波段范围较宽时,由于折射率对于不同波长并非定值,故会导致不同波段的成像位置和焦距产生差异。同时,随着光谱范围的拓宽,差异不断增大^[9],最终导致系统成像质量严重下降。

单透镜光焦度的计算公式为

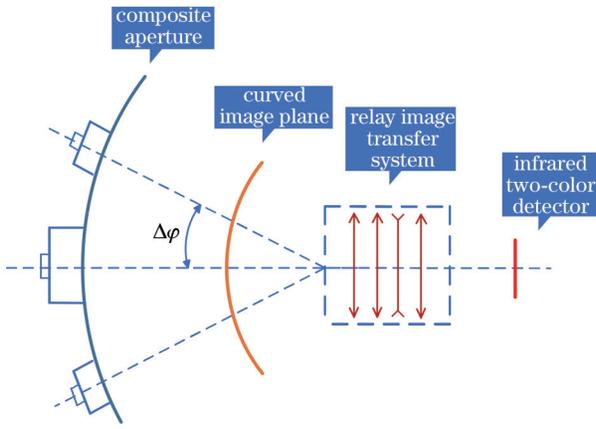


图 3 复合孔径光学系统总体结构图

Fig. 3 Overall structural diagram of composite aperture optical system

$$\Phi = \frac{(n-1)[(r_1-r_2)-t(n-1)]}{nr_1r_2}, \quad (8)$$

式中： Φ 为光焦距； n 为折射率； r_1 和 r_2 分别为前后两个面的曲率； t 为厚度。

对于包含 k 个光组的多波段光学系统，不同波段通过光学系统时的总光焦距为

$$\begin{cases} \Phi_{\lambda_1} = \sum_{i=1}^k \frac{h_i}{h_1} \Phi_i \\ \Phi_{\lambda_2} = \sum_{i=1}^k \frac{h'_i}{h_1} \Phi'_i \end{cases}, \quad (9)$$

式中： λ_1 和 λ_2 为任意两个波段； Φ'_i 为 λ_2 对应的第 i 个透镜的光焦距； h'_i 为第 i 个透镜的光线透射高度； Φ_i 为 λ_1 对应的第 i 个透镜的光焦距； h_i 为第 i 个面上光线入射高度，在薄透镜系统中，近似认为满足 $h_i=h'_i$ 。因此，不同波段间的光焦距差值为

表 1 复合孔径光学系统基本参数

Table 1 Basic parameters of composite aperture optical system

Parameter	Value
Total field angle $2\omega / (^\circ)$	24
Center sub-aperture field angle $2\omega_0 / (^\circ)$	6
Edge sub-aperture field angle $2\omega_1 / (^\circ)$	12
Radius of base R / mm	336
Number of sub apertures N	5
Angle between optical axes of adjacent sub apertures $\Delta\varphi / (^\circ)$	6

$$\Delta\Phi = \Phi_{\lambda_1} - \Phi_{\lambda_2} = \sum_{i=1}^k \frac{h_i}{h_1} (\Phi_i - \Phi'_i). \quad (10)$$

将式(8)代入式(10)中可得到多光组系统等焦距条件为

$$\Delta\Phi = \sum_{i=1}^k \frac{h_i}{h_1} (\Phi_i - \Phi'_i) = \sum_{i=1}^k \left[\left(\frac{h_i \Delta n_i}{h_1 r_{2i-1}} - \frac{\Delta n_i}{r_{2i}} \right) - \frac{h_i \Delta n_i}{h_1 n_i (n_i + \Delta n_i) r_{2i-1} r_{2i}} \right] d_i, \quad (11)$$

式中： Δn_i 为第 i 个透镜不同波段中心波长折射率之差； r_{2i-1} 和 r_{2i} 分别为第 i 个透镜两个面的曲率。

在宽光谱范围内，不同波长等焦距后，光学系统的成像位置仍可能存在差异。为满足不同波长共像面成像，要求不同波长最终的会聚位置到光学系统的距离相等，这本质上与色差的概念相同。下面以任意两个波段 λ_1 和 λ_2 ，理想系统为例讨论两个波段色差的表达式和消色差条件。根据高斯公式，两个波段的物像位置关系为

$$\frac{l'_{i,\lambda_1} - l'_{i,\lambda_2}}{l'_{i,\lambda_1} l'_{i,\lambda_2}} - \frac{l_{i,\lambda_1} - l_{i,\lambda_2}}{l_{i,\lambda_1} l_{i,\lambda_2}} = \Phi_{i,\lambda_1} - \Phi_{i,\lambda_2} \Rightarrow \begin{cases} \frac{1}{l'_{i,\lambda_1}} - \frac{1}{l_{i,\lambda_1}} = \Phi_{i,\lambda_1} \\ \frac{1}{l'_{i,\lambda_2}} - \frac{1}{l_{i,\lambda_2}} = \Phi_{i,\lambda_2} \end{cases}, \quad (12)$$

式中： l'_{i,λ_1} 和 l'_{i,λ_2} 为两个波段透过系统第 i 片透镜对应的像方截距； l_{i,λ_1} 和 l_{i,λ_2} 为两个波段透过系统第 i 片透镜对应的物方截距。由几何光学知识可知 $lu = h = l'u'$ ，其中 l 为物方截距， u 为物方孔径角， l' 为像方截距， u' 为像方孔径角，代入式(12)可得

$$(l'_{i,\lambda_1} - l'_{i,\lambda_2})u'_{i,\lambda_1}u'_{i,\lambda_2} - (l_{i,\lambda_1} - l_{i,\lambda_2})u_{i,\lambda_1}u_{i,\lambda_2} = (\Phi_{i,\lambda_1} - \Phi_{i,\lambda_2})h_{i,\lambda_1}h_{i,\lambda_2}, \quad (13)$$

式中： u'_{i,λ_1} 和 u'_{i,λ_2} 分别为两个波段透过系统第 i 片透镜对应的像方孔径角； u_{i,λ_1} 和 u_{i,λ_2} 分别为两个波段透过系统第 i 片透镜对应的物方孔径角； h_{i,λ_1} 和 h_{i,λ_2} 分别为两个波段的投影高度。整个系统满足

$$\begin{aligned} & [(l'_{1,\lambda_1} - l'_{1,\lambda_2})u'_{1,\lambda_1}u'_{1,\lambda_2} - (l_{1,\lambda_1} - l_{1,\lambda_2})u_{1,\lambda_1}u_{1,\lambda_2}] + [(l'_{2,\lambda_1} - l'_{2,\lambda_2})u'_{2,\lambda_1}u'_{2,\lambda_2} - (l_{2,\lambda_1} - l_{2,\lambda_2})u_{2,\lambda_1}u_{2,\lambda_2}] + \dots + \\ & [(l'_{N,\lambda_1} - l'_{N,\lambda_2})u'_{N,\lambda_1}u'_{N,\lambda_2} - (l_{N,\lambda_1} - l_{N,\lambda_2})u_{N,\lambda_1}u_{N,\lambda_2}] = \\ & (\Phi_{1,\lambda_1} - \Phi_{1,\lambda_2})h_{1,\lambda_1}h_{1,\lambda_2} + (\Phi_{2,\lambda_1} - \Phi_{2,\lambda_2})h_{2,\lambda_1}h_{2,\lambda_2} + \dots + (\Phi_{N,\lambda_1} - \Phi_{N,\lambda_2})h_{N,\lambda_1}h_{N,\lambda_2}, \quad (14) \end{aligned}$$

系统转面公式和光焦度表达公式为

$$\begin{cases} l'_{i,\lambda_1} - l'_{i,\lambda_2} = (l_{i+1,\lambda_1} - d_{i,i+1}) - (l_{i+1,\lambda_2} - d_{i,i+1}), \\ u'_{i,\lambda_1} u'_{i,\lambda_2} = u_{i+1,\lambda_1} u_{i+1,\lambda_2} \end{cases}, \quad (15)$$

式中: $d_{i,i+1}$ 为第 i 片透镜和第 $i+1$ 片透镜的间隔。

结合式 (15), 对于不同波段起始物距相同, 即 $l_{i,\lambda_1} = l_{i,\lambda_2}$, 可近似得到整个系统波段间色差的定义式

$$(l'_{N,\lambda_1} - l'_{N,\lambda_2}) - (l_{1,\lambda_1} - l_{1,\lambda_2}) = \sum_{i=1}^N \frac{h_i h_{i+1}}{u'_{N,\lambda_1} u'_{N,\lambda_2}} \Delta \Phi_i, \quad (16)$$

可得到多波段系统消波段间色差公式为

$$\Delta l' = \sum_{i=1}^N \frac{h_i h_{i+1}}{u'_{n,\lambda_1} u'_{n,\lambda_2}} \frac{h_i}{h_1} \left[\frac{\Delta n_i}{r_{2i-1}} - \frac{\Delta n_i}{r_{2i}} - \frac{h_i \Delta n_i d_i}{h_i n_i (n_i + \Delta n_i) r_{2i+1} r_{2i}} \right]. \quad (17)$$

3 复合孔径系统设计及仿真

3.1 复合孔径光学系统总体设计指标

复合孔径光学系统总体设计指标如表 2 所示。复合孔径光学系统的焦距取决于

$$\frac{\mu v}{f'} = \frac{a}{q}, \quad (18)$$

式中: v 为目标在探测器靶面所占的最少像元数, 根据 Johnson 准则, 设定 $v=2$; μ 为探测器像元大小; q 为探

表 2 复合孔径光学系统总体设计指标

Table 2 Overall design indexes of composite aperture optical system

Parameter	Value
Detection distance /km	20
Target size /m	6
Imaging band / μm	3.7-4.8, 7.7-9.5
Detector resolution /(pixel \times pixel)	320 \times 256
Pixel size of detector / μm	30

测距离; a 为目标大小; f' 为光学系统的焦距。

根据式 (18) 和复合孔径光学系统相关参数可计算出主孔径和副孔径系统的焦距应分别满足 $f'_1 \geq 200 \text{ mm}$ 和 $f'_2 \geq 40 \text{ mm}$ 。

根据中长波红外双色探测器的像元尺寸大小 μ , 可确定复眼系统的奈奎斯特特征频率为

$$F_{\text{Nyquist}} = \frac{1000}{2\mu} = \frac{1000}{2 \times 30} \approx 17 \text{ lp/mm}。 \quad (19)$$

3.2 中心子孔径系统设计及像质评价

拟设计的红外双波段复合孔径光学系统包含中波红外波段和长波红外波段。中心子孔径光学系统性能指标如表 3 所示, 其中 F 数是光学系统相对口径的倒数, 相对口径等于入瞳直径除以焦距, 即 F 数等于焦距除以入瞳直径。

表 3 中心子孔径光学系统性能指标

Table 3 Performance indexes of central sub-aperture optical system

Parameter	Value
Working wavelength / μm	3.7-4.8 (mid-wave infrared), 7.7-9.5 (long wave infrared)
Focal length /mm	200
F number	4
Field of view /($^\circ$)	6

设计得到的中心子孔径光学系统结构采用红外中波、长波共焦共光路形式, 由 6 片玻璃构成, 采用红外玻璃中常见的硫化锌和锗搭配硫系 IRG 系列玻璃, 硫化锌和锗具有良好的折射率均匀性, 在中长波红外波

段具有较高的透过率^[10]。硫系玻璃拥有较低的折射率温度系数 dn/dt 和色散系数^[11], 有利于红外双波段共焦和无热化处理, 最终中心子孔径结构系统如图 4 所示。

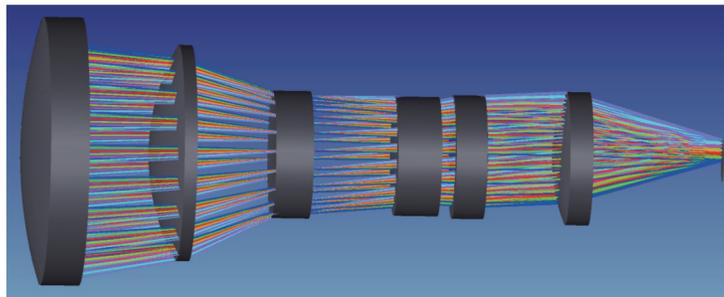


图 4 中心子孔径系统结构

Fig. 4 Structural diagram of central sub-aperture system

图 5 为中心子孔径光学系统不同波段成像的光学调制传递函数 (MTF) 图, 其中横坐标表示空间频率,

纵坐标表示不同空间频率下的对比度。可以看出, 中心子孔径系统在中波红外和长波红外波段的

17.0 lp/mm 特征频率处均接近衍射极限, 成像质量

良好。

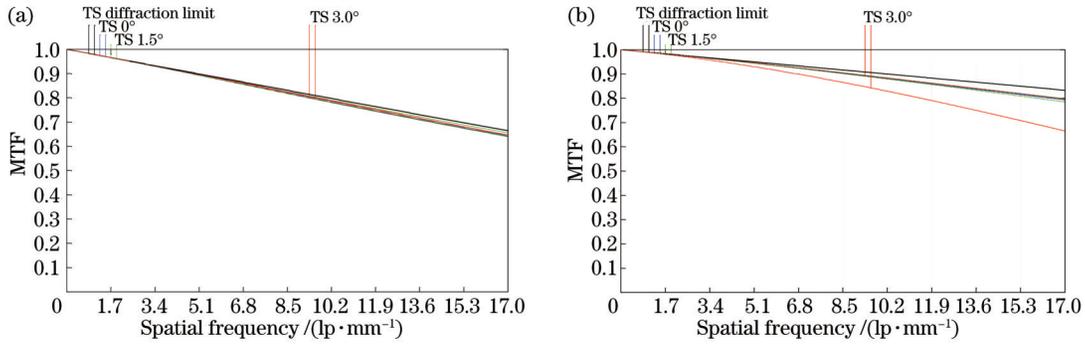


图 5 中心子孔径光学系统 MTF 曲线。(a)长波红外波段;(b)中波红外波段

Fig. 5 MTF curves of central sub-aperture optical system. (a) Long wave infrared band; (b) mid-wave infrared band

因子孔径光学系统属于小像差系统, 故采用波像差来对子孔径光学进行像质评价。图 6 为中心子孔径光学系统不同波段成像的波像差图。可以看出, 边缘

子孔径系统在中波红外和长波红外波段的峰谷(PV)值分别为 0.092λ 和 0.138λ , 满足瑞利判据, 成像质量良好。

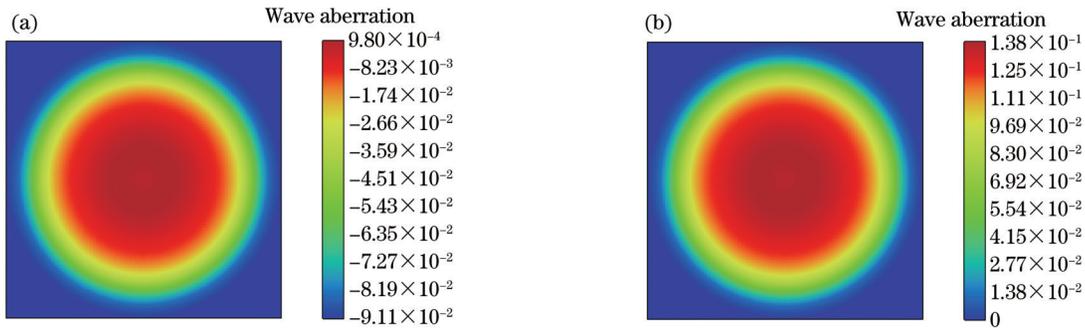


图 6 中心子孔径光学系统不同波段成像的波像差。(a)长波红外波段;(b)中波红外波段

Fig. 6 Wave aberration maps of central sub-aperture optical system imaging in different bands. (a) Long wave infrared band; (b) mid-wave infrared band

3.3 边缘子孔径系统设计及像质评价

边缘子孔径光学系统性能指标如表 4 所示。

表 4 边缘子孔径光学系统性能指标

Table 4 Performance indexes of edge sub-aperture optical system

Parameter	Value
Working wavelength / μm	3.7-4.8 (mid-wave infrared), 7.7-9.5 (long wave infrared)
Focal length /mm	50
F number	4
Field of view /($^\circ$)	12

根据设计参数中的复合孔径基底曲率半径为 361 mm 和中心子孔径与边缘子孔径后截距大小均为 25 mm, 将基底光阑阵列设计安装在子系统最后一片透镜组成的环带中, 即中心子孔径系统所成像面为一曲率半径为 336 mm 的焦曲面。

边缘子孔径光学系统采用 4 片式共焦共光路结构, 通过更换材料和加入一片非球面镜对系统进行像差优化, 得到了以硫化锌、硒化锌搭配硫系 IRG 系列玻璃的边缘子孔径系统, 系统结构图如图 7 所示。

图 8 为边缘子孔径光学系统不同波段成像的光学 MTF 图。可以看出, 边缘子孔径系统在中波红外和长波红外波段的 17.0 lp/mm 特征频率处均接近衍射极限, 成像质量良好。

图 9(a)、(b)为边缘子孔径光学系统不同波段成像的波像差图。可以看出, 边缘子孔径系统在中波红外和长波红外波段的 PV 值分别为 0.12λ 和 0.051λ , 满足瑞利判据, 成像质量良好。

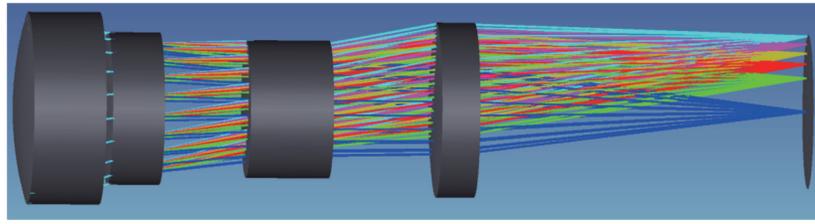


图 7 边缘子孔径光学系统结构图

Fig. 7 Structural diagram of edge sub-aperture optical system

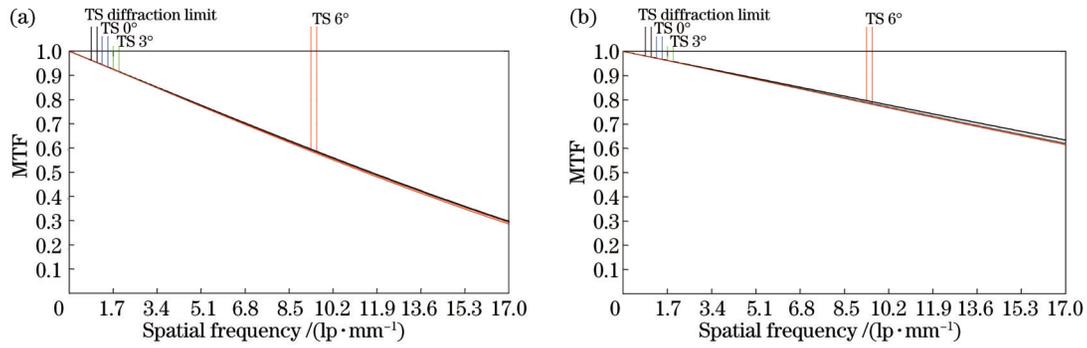


图 8 边缘子孔径光学系统 MTF 曲线。(a)长波红外波段;(b)中波红外波段

Fig. 8 MTF curves of edge sub-aperture optical system. (a) Long wave infrared band; (b) mid-wave infrared band

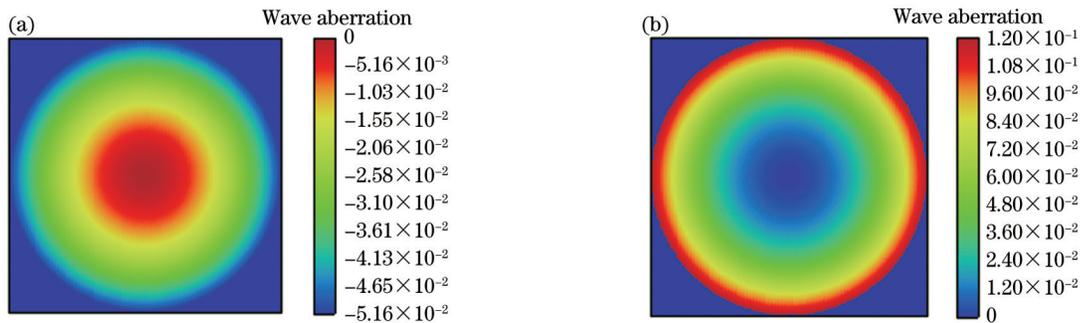


图 9 边缘子孔径光学系统不同波段成像的波像差。(a)长波红外波段;(b)中波红外波段

Fig. 9 Wave aberration maps of edge sub-aperture optical system imaging at different bands. (a) Long wave infrared band; (b) mid-wave infrared band

3.4 中继转像系统设计及像质评价

复合孔径系统的像是曲率和基底相同的一个曲

面,而目前大多数光电探测器是平面,从而存在像面匹配的问题,通常的解决方案如表 5 所示。

表 5 像面匹配方案对比

Table 5 Comparison of image plane matching schemes

Scheme	Advantage	Disadvantage
Matching curved surface image sensor	Whole system has small volume and field of view exceeding 150°	Complex process and difficult manufacturing
Adding optical fiber bundle relay image conversion system	Field of view can reach 140° and matching difficulty is low	System volume is slightly larger and there are few imaging channels
Adding optical relay image conversion system	There are many sub-eyes with field of view exceeding 120°	System volume is slightly larger
Design for different layers and different focal lengths	Whole system is small in size	Field of view is less than 100° and number of sub-eyes is insufficient

综合考虑以上 4 种实现像面匹配的方案,加入光学中继转向系统来实现像面匹配是较为合适的方案,将复合孔径系统的焦曲面转换成焦平面像,再被光电探测器采集。

中继转像系统的作用是将所有子孔径阵列所成的焦曲面像转换成焦平面像,以匹配平面探测器接收并处理图像。中继转像系统应具有与子孔径系统焦曲面相同曲率半径的物面,即中继系统物面曲率半径为 336 mm,且中继系统物面口径需大于子孔径焦曲面口径^[12],

以保证所有子孔径发出的光线均可被中继系统接收。

设计得到的中继系统结构上采用红外中波、长波共焦共光路,搭配 C330S 中长波双色制冷型探测器接收,解决了不同波段采集信息不同步的问题,为达到 100% 冷光阑效率,将中继系统光阑设计与探测器冷光阑重合^[13]。

依据设计完成的子孔径阵列,探测器靶面尺寸取 12.29 mm,得到中继转像系统的设计参数如表 6 所示。

表 6 中继转像系统的性能指标

Table 6 Performance indexes of relay image transfer system

Parameter	Value
Working wavelength / μm	3.7-4.8 (mid-wave infrared), 7.7-9.5 (long wave infrared)
Focal length /mm	3.4
F number	4
Field of view /($^\circ$)	≥ 30

根据设计指标要求,寻找一种性能参数接近的红外超广角镜头作为初始结构进行设计,设计得到的中继系统结构上采用红外中波、长波共焦共光路,焦距为 3.4 mm,相对孔径为 1:4,视场角为 32° ,并搭配 C330S 中长波双色制冷型探测器接收,解决了不同波段采集信息不同步的问题。同时,为达到 100% 冷光

阑效率,将中继系统光阑设计与探测器冷光阑重合。中继转像系统共由 8 片玻璃组成,采用硒化锌、氟化钡、锗三种光学晶体搭配 IRG 硫系玻璃完成,其中在第 4 片玻璃后表面引入一面二元衍射面,第 8 片玻璃前后表面均为偶次非球面。中继转像系统结构图如图 10 所示。

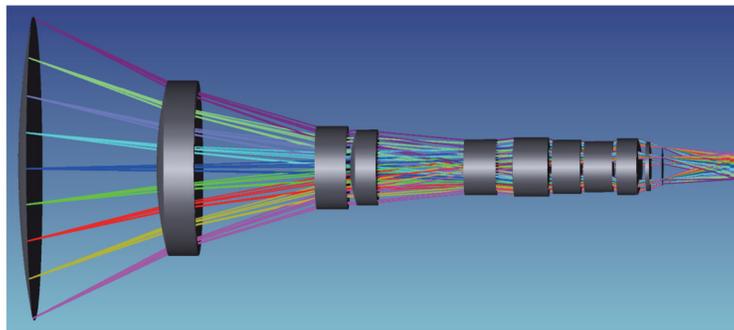


图 10 中继转像系统结构图

Fig. 10 Structural diagram of relay image transfer system

中继转像系统的光学 MTF 图如 11(a)、(b)所示。中波红外部分 MTF 在特征频率 17 lp/mm 处大于

0.68,长波红外部分 MTF 在特征频率 17.0 lp/mm 处大于 0.55,曲线平滑过渡,满足成像质量要求。

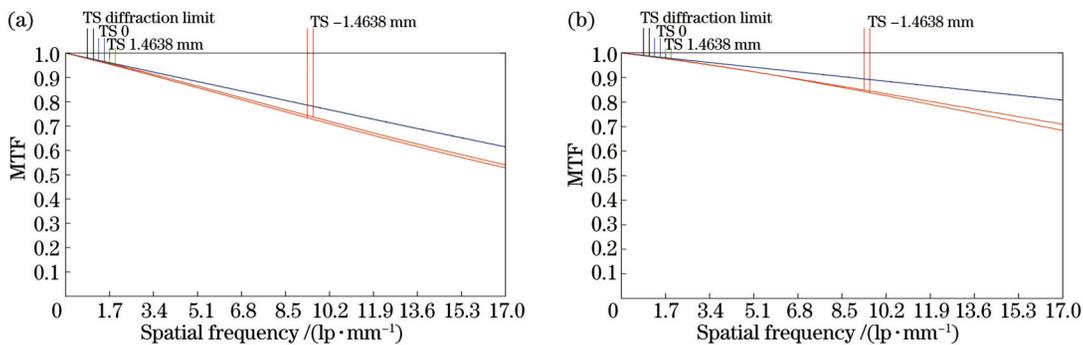


图 11 中继转像光学系统 MTF 曲线。(a)长波红外波段;(b)中波红外波段

Fig. 11 MTF curves of relay image transfer optical system. (a) Long wave infrared band; (b) mid-wave infrared band

图 12 为中继转像系统的点列图。图 12(a) 为长波红外波段的点列图, 可以看出长波红外波段弥散斑的均方根值最大为 $6.713 \mu\text{m}$, 系统在长波红外波段成像

质量良好; 图 12(b) 为中波红外波段的点列图, 可以看出中波红外波段弥散斑的均方根值最大为 $8.748 \mu\text{m}$, 系统中波红外波段成像质量良好。

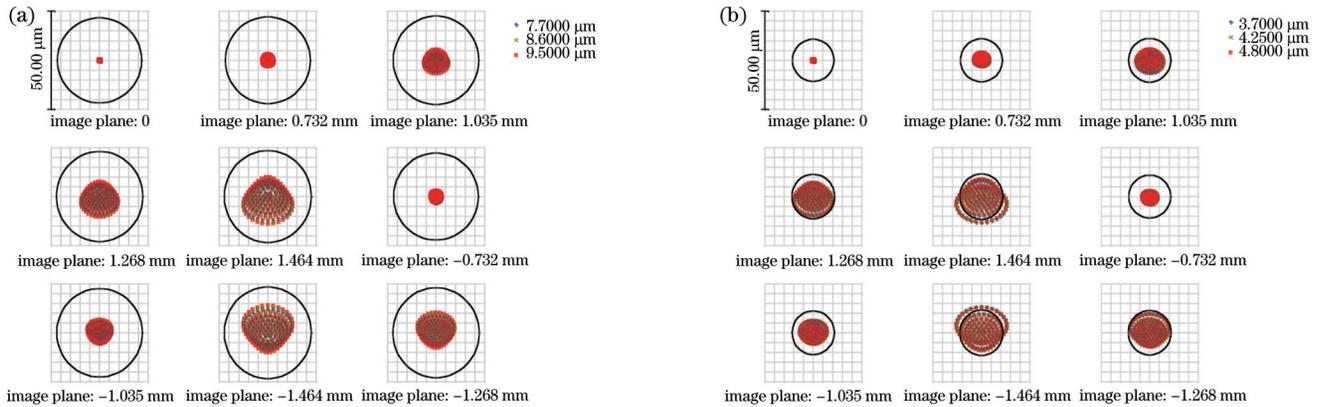


图 12 中继转像光学系统点列图。(a)长波红外波段;(b)中波红外波段

Fig. 12 Point sequence diagram of relay image transfer optical system. (a) Long wave infrared band; (b) mid-wave infrared band

中继转像系统的网格畸变如图 13 所示。可以发现, 全视场最大畸变为 -1.6% , 主要出现在边缘视场

处, 0.7 视场内最大畸变为 -0.8% , 满足中继转像系统畸变设计要求。

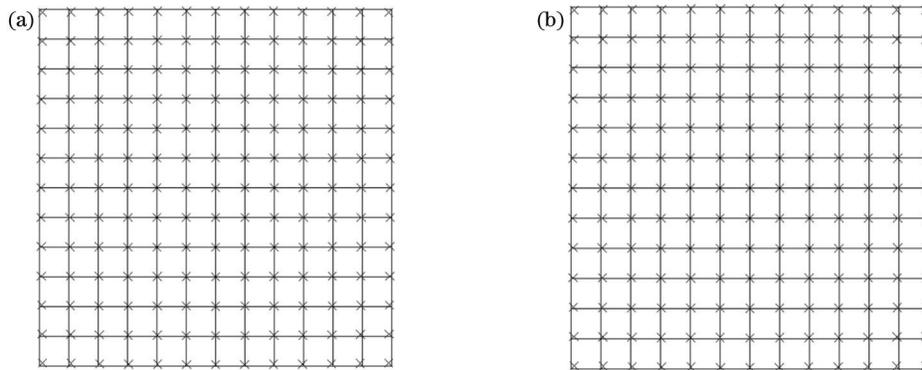


图 13 中继转像光学系统网格畸变图。(a)长波红外波段;(b)中波红外波段

Fig. 13 Grid distortion diagram of relay image transfer optical system. (a) Long wave infrared band; (b) mid-wave infrared band

将设计完成的中心子孔径光学系统、边缘子孔径光学系统与中继转像系统进行拼接组合, 完成复合孔径系统的整体设计。组合时要遵循光瞳衔接原则, 即子孔径系统出瞳要与中继转像系统入瞳位置重合。除

此之外, 还应满足中继转像系统物面范围大于子孔径组合系统的焦曲面口径和两者具有相同的曲率半径。复合孔径光学系统的成像光路图如图 14 所示。

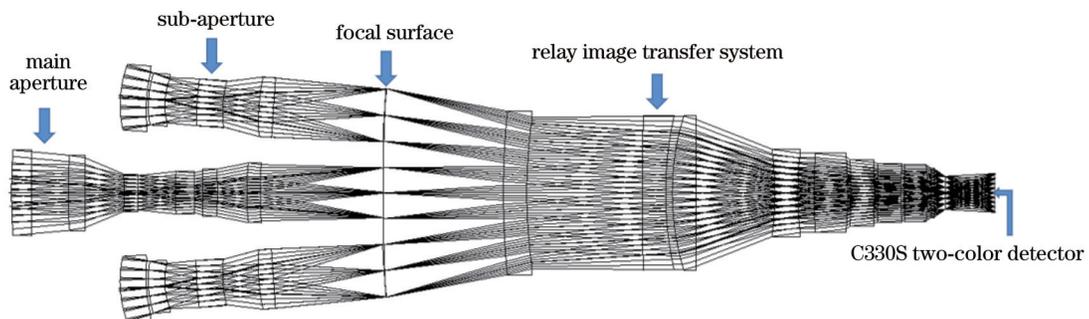


图 14 复合孔径光学系统成像光路图

Fig. 14 Imaging optical path diagram of composite aperture optical system

3.5 系统接收能量分析

光学系统简单来说就是一个能量收集装置,将目标反射或辐射的能量进行收集并传递到探测器靶面上,这个过程伴随着一定的物体现象,有一个目标点对接收点的呼应,当接受点的能量值在不低于探测器最低要求值时,说明其能良好成像,并且接收到的能量密度越高,系统响应信号的能力越强,从而能快速作出

反应。

如图 15(a)所示,中波光学系统的能量接收率有 90% 的能量都在直径为 30 μm(探测器的一个像元)的圆内。如图 15(b)所示,长波光学系统的能量接收率有 85% 的能量都在直径为 30 μm 的圆内。各波段下的能量汇聚程度较高,满足接收系统的设计要求。

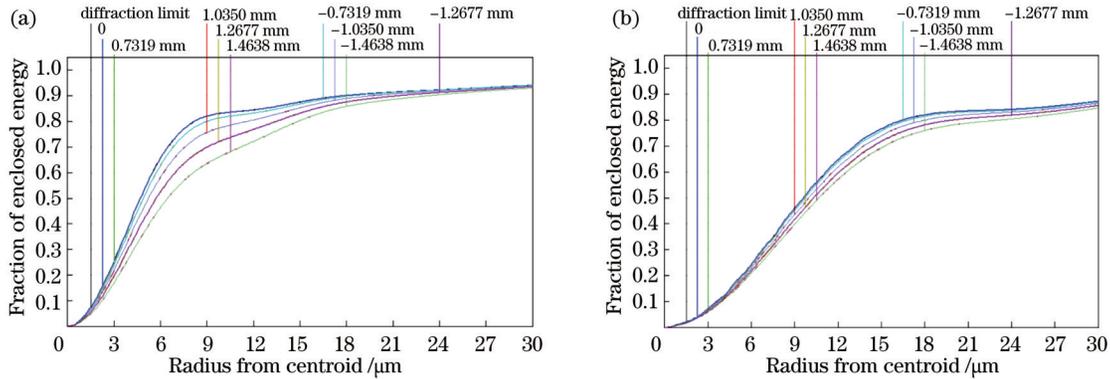


图 15 接收光学系统的能量包围图。(a)中波红外波段;(b)长波红外波段

Fig. 15 Energy enclosed diagram of receiving optical system. (a) Mid-wave infrared band; (b) long wave infrared band

查询相关文献^[14]可知,红外材料如果用氟化铪和硫化锌相互交替成多层膜系,峰值透过率可达到 99.2%,平均透过率可达到 98% 以上。因此,硫化锌、锗和硫系 IRG 系列玻璃使用氟化铪和硫化锌交替的多层膜系可以实现高透中长波,提高光学系统的透过率。经计算,该系统的透过率均大于 65%,满足光学仪器的使用要求。

4 系统分析

4.1 系统消热差分析

为了克服温度对光学系统成像质量的影响,增强光学系统的普适性,需对光学系统进行消热差处理(温度范围为 -40~60 °C)。考虑到红外双波段复合孔径光学系统中子孔径系统数量众多和中继转像系统口径较大,本系统采用光学被动式无热化设计方法。光学被动式无热化方法利用不同光学材料之间的热特性差异,通过合理搭配组合来消除温度变化对系统性能产生的影响^[15]。光学被动式易实现小体积、高性能和轻量化的设计目标。实现光学被动消热差需要满足总光焦度、消色差和消热差方程^[16],即

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^k h_i \phi_i = \phi \\ \left(\frac{1}{h_1 \phi}\right)^2 \sum_{i=1}^k h_i^2 \gamma_i \phi_i = 0 \\ \left(\frac{1}{h_1 \phi}\right)^2 \sum_{i=1}^k h_i^2 \theta_i \phi_i = \alpha_L m \end{cases}, \quad (20)$$

式中:φ为光学系统总光焦度;φ_i为各透镜组的光焦度;γ_i为色散系数;θ_i为光热膨胀系数;m为机械构件长

度;α_L为各部分镜筒材料的线膨胀系数。结合式(20)可计算出系统无热化各个组元光焦度应满足的关系,并选择合适的材料与机械构件搭配进行消热差处理,镜筒材料选择常用的铝合金(热膨胀系数为 23.6 × 10⁻⁶ K⁻¹)。

高低温变化造成红外双波段复合孔径光学系统产生热离焦,根据焦深公式计算系统焦深^[17],即

$$D = \pm 2\lambda (f/\#)^2, \quad (21)$$

式中:λ为波长(工作波段内的中心波长);f为光学系统的焦距;#为入瞳直径。由式(21)可得:子孔径系统中波波段的焦深和长波波段的焦深分别为 ±136.0 μm 和 ±275.2 μm;中继转像系统中波波段的焦深和长波波段的焦深分别为 ±18.1 μm 和 ±68.8 μm。

表 7~9 展示了消热差完成后子孔径系统和中继转像系统不同波段在不同温度下的焦距值。

表 7 中心子孔径不同波段在不同温度下的焦距值

Table 7 Focal length values of different bands of central sub-aperture at different temperatures unit: mm

Temperature / °C	Focal length value at mid-wave infrared	Focal length value at long wave infrared
-40	199.928	200.096
20	199.928	200.087
60	199.925	200.083

结合表 7~9 可知,实际系统无热化完成后,子孔径系统和中继系统高低温时最大离焦量均处于系统焦深范围内。图 16 为中心子孔径光学系统中波/长波段高低温下的光学 MTF 曲线。

无热化完成后中心子孔径系统中波波段的温度

表 8 边缘子孔径不同波段在不同温度下的焦距值

Table 8 Focal length values of different bands of edge sub-aperture at different temperatures

unit: mm

Temperature / °C	Focal length value at mid-wave infrared	Focal length value at long wave infrared
-40	49.9043	50.0000
20	49.9039	50.0000
60	49.9037	50.0001

表 9 中继转像系统不同波段在不同温度下的焦距值

Table 9 Focal length values of different bands of relay image transfer system at different temperatures

unit: mm

Temperature / °C	Focal length value at mid-wave infrared	Focal length value at long wave infrared
-40	3.39992	3.40254
20	3.39750	3.40000
60	3.39586	3.39823

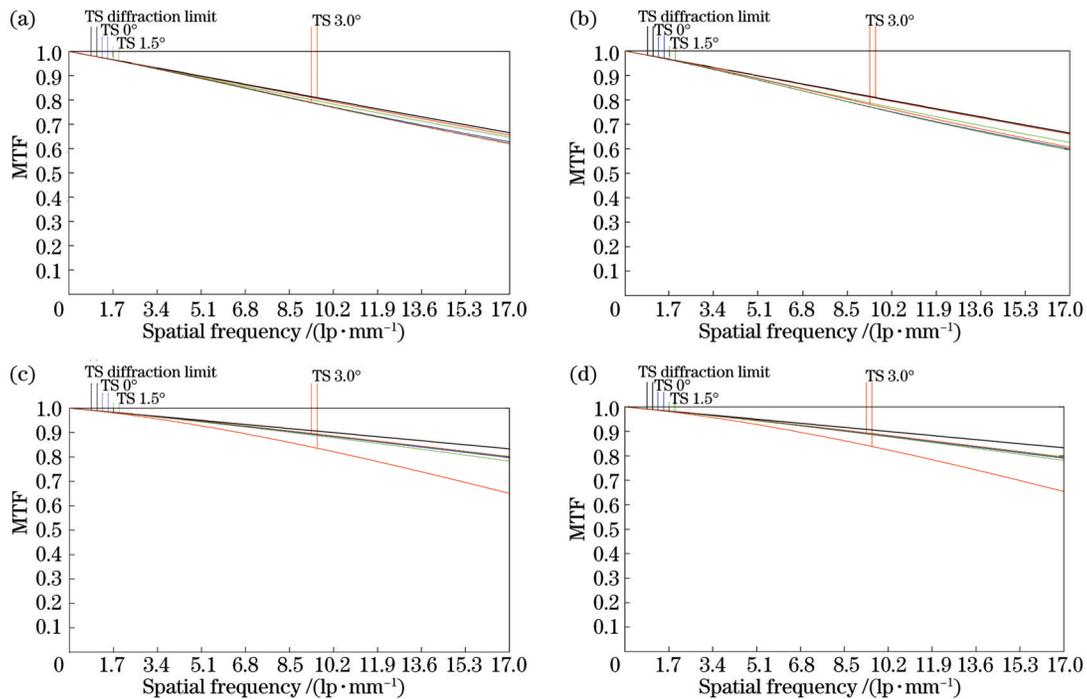


图 16 中心子孔径光学系统不同波段在高低温下的 MTF 曲线。(a)长波红外波段(温度为-40 °C);(b)长波红外波段(温度为 60 °C);(c)中波红外波段(温度为-40 °C);(d)中波红外波段(温度为 60 °C)

Fig. 16 MTF curves of central sub-aperture optical system at different wavelengths under high and low temperatures. (a) Long wave infrared band (-40 °C); (b) long wave infrared band (60 °C); (c) mid-wave infrared band (-40 °C); (d) mid-wave infrared band (60 °C)

下的 MTF 值在 17.0 lp/mm 空间频率处均大于 0.7, 长波波段不同温度下的 MTF 值在 17.0 lp/mm 空间频率均大于 0.6, 且均接近衍射极限。图 17 为边缘子孔径光学系统在中波/长波波段高低温下的光学 MTF 曲线。

无热化完成后中继系统中波波段不同温度下的 MTF 值在 17.0 lp/mm 空间频率处均大于 0.6, 长波波段不同温度下的 MTF 值在 17.0 lp/mm 空间频率处均大于 0.3, 且均接近衍射极限, 满足消热差后系统像质的要求。图 18 为中继转像系统在中波/长波波段高低温下的光学 MTF 曲线。

无热化完成后中继系统中波波段不同温度下的 MTF 值在 17.0 lp/mm 空间频率处均大于 0.5, 长波波

段不同温度下的 MTF 值在 17.0 lp/mm 空间频率处均大于 0.7, 且均接近衍射极限, 满足消热差后系统像质的要求。

4.2 公差分析

实际生产加工中光学系统不可避免地会受到加工、装调的影响, 并且后续使用过程中会存在使用人员操作不当的问题, 这些都会造成光学系统产生一定大小的误差, 故进行公差分析是衡量光学系统是否可靠的重要指标。

光学系统元件在加工制造环节所造成的误差和整体光学系统总体误差之间的关系为

$$d\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial x_1} + \frac{\partial\varphi}{\partial x_2} + \frac{\partial\varphi}{\partial x_3} + \dots + \frac{\partial\varphi}{\partial x_i}, \quad (22)$$

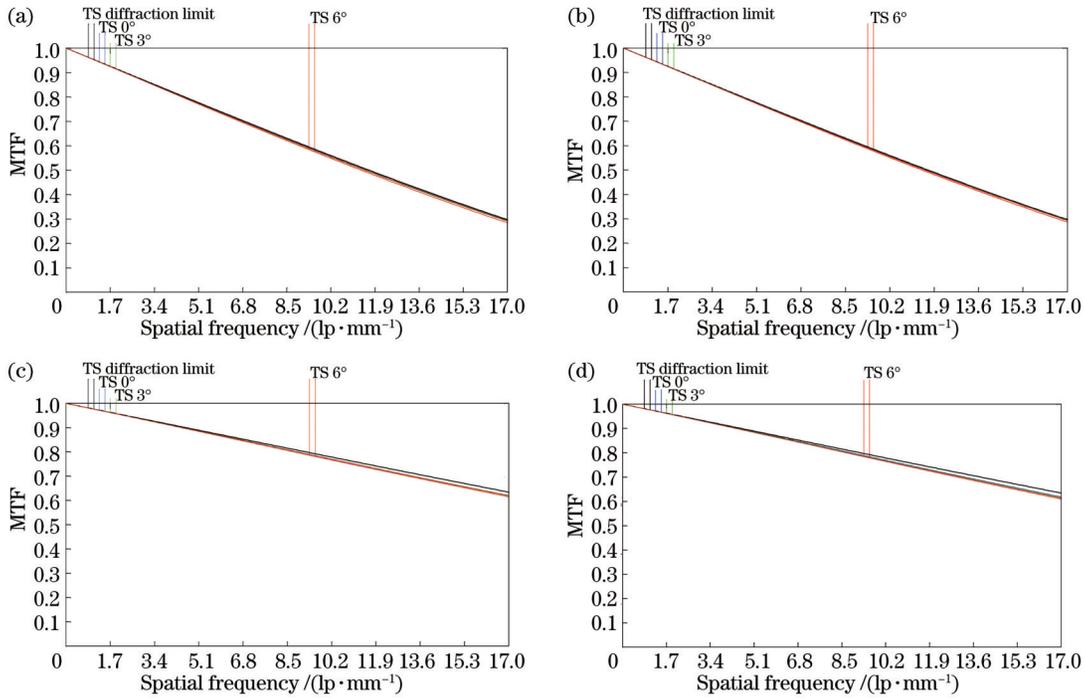


图 17 边缘子孔径光学系统不同波段在高低温下的 MTF 曲线。(a)长波红外波段(温度为-40 °C);(b)长波红外波段(温度为 60 °C);(c)中波红外波段(温度为-40 °C);(d)中波红外波段(温度为 60 °C)

Fig. 17 MTF curves of edge sub-aperture optical system at different wavelengths under high and low temperatures. (a) Long wave infrared band (-40 °C); (b) long wave infrared band (60 °C); (c) mid-wave infrared band (-40 °C); (d) mid-wave infrared band (60 °C)

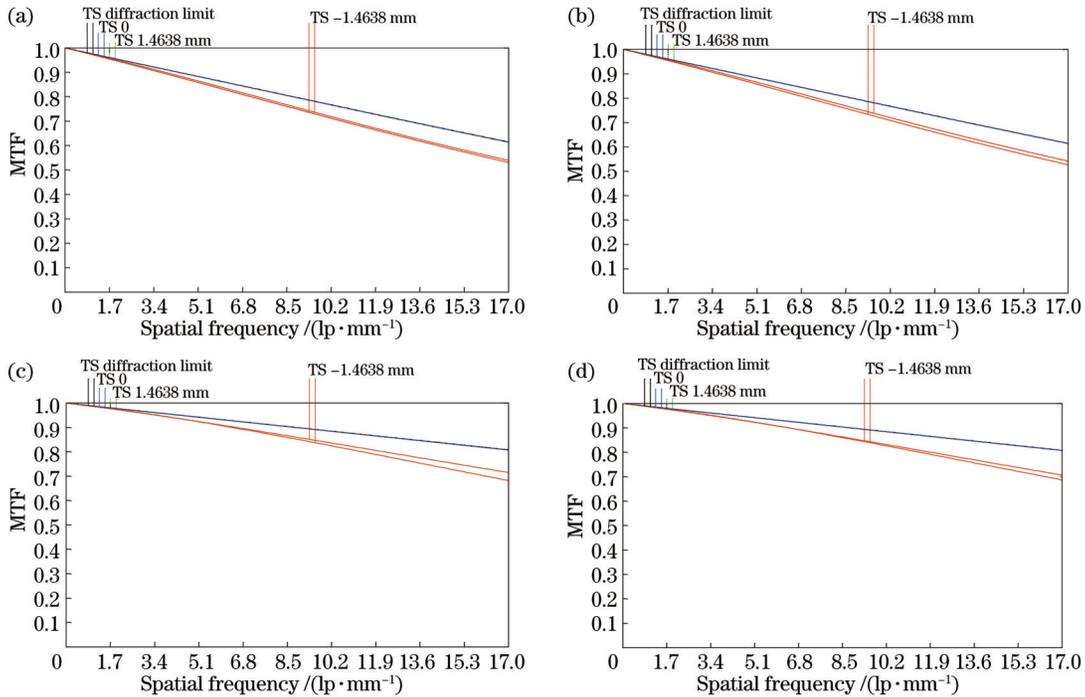


图 18 中继转像光学系统不同波段在高低温下的 MTF 曲线。(a)长波红外波段(温度为-40 °C);(b)长波红外波段(温度为 60 °C);(c)中波红外波段(温度为-40 °C);(d)中波红外波段(温度为 60 °C)

Fig. 18 MTF curves of relay image transfer optical system at different wavelengths under high and low temperatures. (a) Long wave infrared band (-40 °C); (b) long wave infrared band (60 °C); (c) mid-wave infrared band (-40 °C); (d) mid-wave infrared band (60 °C)

式中： φ 为综合评价函数； $x_1 \sim x_i$ 为系统公差变量。表 10 为复合孔径光学系统的公差分配表。

选择衍射 MTF 均值变化作为衡量系统性能变化

的标准，并采用灵敏度和 Monte Carlo 分析方法分析 500 组镜头数据，结论以 MTF 均值变化概率形式给出。图 19 为红外中波和长波波段采用表 10 所分配公

表 10 复合孔径光学系统的公差分配

Table 10 Tolerance allocation of composite aperture optical system

Parameter	Value
Tolerance of radius of curvature, thickness, eccentricity /mm	± 0.02
Tilt tolerance /($^{\circ}$)	± 0.02
Surface irregularity	0.2
Material refractive index tolerance	± 0.001
Abbe number tolerance	± 0.5

差值分析的结果。根据公差分析结果,中波红外波段复合孔径光学系统在奈奎斯特频率 17.0 lp/mm 处超过 90% 的样本的 MTF 预估值大于 0.4,长波红外波段复合孔径光学系统在奈奎斯特频率 17.0 lp/mm 处超过 90% 的样本的 MTF 预估值大于 0.3,公差分配合理且较为宽松,易于加工生产,装配后可以满足成像质量要求。

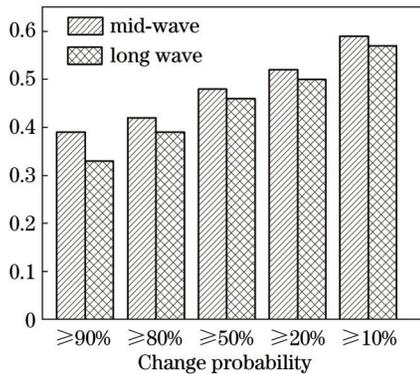


图 19 复合孔径系统公差分析

Fig. 19 Tolerance analysis of composite aperture system

5 结 论

设计了一款红外双波段共光路复合孔径光学系统,基于视场拼接数学模型,计算出中心子眼与边缘子眼光轴夹角。分析多波段消色差条件,保证中长波波段共焦共像面成像。通过中继转像系统相关理论计算,解决了复合孔径系统所成的曲面像无法与平面探测器良好匹配的问题。设计结果表明:所设计的共光路复合孔径光学系统在红外中波/长波波段所有位置处的子通道MTF值在17.0 lp/mm空间频率处均大于0.4,均接近衍射极限;成像系统点列斑均小于 $8.5\ \mu\text{m}$,成像质量良好;主孔径系统探测距离可达到20 km,拼接后系统总视场可达到 24° 。最后,依据无热化分析和公差分析全面评价了复合孔径系统的成像性能。分析结果表明,系统满足成像质量要求,具有探测能力强、温度变化适应性良好的特点,在远距离探测识别、军事侦察等领域中均拥有广阔的应用空间。

参 考 文 献

[1] 潘璐, 向阳, 李琦, 等. 微光/长波红外大视场共口径光学系统

设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2020, 43(6): 1-7.

Pan L, Xiang Y, Li Q, et al. Design of visible light and long wave infrared dual-band common aperture optical system[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 43(6): 1-7.

[2] 何建争, 简慧杰, 马孟超, 等. 基于虚拟双球面的仿生复眼系统标定[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0722001.

He J Z, Jian H J, Ma M C, et al. Calibration of artificial compound eye system based on virtual double spherical surfaces [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0722001.

[3] Law N M, Fors O, Wulfken P, et al. The Evryscope: the first full-sky gigapixel-scale telescope[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9145: 91450Z.

[4] Karimzadeh A. Design and simulation of concave and planar superposition compound eye[J]. Optical Review, 2019, 26(6): 676-680.

[5] 张家铭, 陈宇, 覃海棋, 等. 大视场并列型仿生复眼光学系统[J]. 光学精密工程, 2020, 28(5): 1012-1020.

Zhang J M, Chen Y, Qin H Q, et al. Optical system of bionic compound eye with large field of view[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(5): 1012-1020.

[6] 苏鹏程, 陈宇, 张家铭, 等. 基于六边形紧密拼接结构的仿生复眼系统设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(4): 20200338.

Su P C, Chen Y, Zhang J M, et al. Design of bionic compound eye system based on hexagonal closely spliced structure[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(4): 20200338.

[7] 王元元. 曲面仿生复眼成像系统设计及微加工技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2019.

Wang Y Y. Design and micromachining technology of surface bionic compound eye imaging system[D]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019.

[8] 李晓蕾, 高明. 小型化复合孔径双波段观瞄系统设计[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(4): 20210549.

Li X L, Gao M. Design of miniaturized dual-band observation system with composite aperture[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(4): 20210549.

[9] 曲锐, 邓键. 红外双波段双视场消色差光学系统中消波段间色差条件(方法)的研究[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0122006.

Qu R, Deng J. Methods of correcting between-band chromatic aberration in infrared dual-band dual-field of view athermalized optical design[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0122006.

[10] 付强, 张新. 中波/长波双色红外光学系统材料选择[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0208003.

Fu Q, Zhang X. Materials choose for mid-wave/long-wave dual-waveband infrared optics[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0208003.

[11] 虞林瑶, 魏群, 张天翼, 等. 中波红外长焦距折反光学系统设计[J]. 中国光学, 2015, 8(2): 234-240.

Yu L Y, Wei Q, Zhang T Y, et al. Design of long focal infrared catadioptric optical system for multi-guided system[J]. Chinese Optics, 2015, 8(2): 234-240.

[12] 陈阳, 高明, 胡雪蕾, 等. 共口径宽光谱复眼光学系统设计[J]. 光子学报, 2020, 49(3): 0322002.

Chen Y, Gao M, Hu X L, et al. Design of co-aperture wide

- spectrum compound eye optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(3): 0322002.
- [13] 张宇, 王文生. 制冷式红外双波段共光路折衍混合摄远物镜设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0522006.
Zhang Y, Wang W S. Design of cooled infrared dual-band common path refractive-diffractive telephoto objective[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0522006.
- [14] 闫兰琴, 张树玉, 刘伟, 等. Ge 基底 7.5~11.5 μm 波段高性能红外增透膜的研制[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(5): 871-874.
Yan L Q, Zhang S Y, Liu W, et al. High performance infrared wide-band (7.5~11.5 μm) anti-reflective film on germanium substrate[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 871-874.
- [15] 王宇, 许阳阳, 刘爱云, 等. 长波红外显微成像光学系统的设计与仿真[J]. *光学学报*, 2020, 40(6): 0622001.
Wang Y, Xu Y Y, Liu A Y, et al. Design and simulation of long-wavelength infrared microscopic imaging optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(6): 0622001.
- [16] 田晓航, 薛常喜. 小 F 数红外双波段无热化折衍摄远物镜设计[J]. *光学学报*, 2022, 42(14): 1422002.
Tian X H, Xue C X. Athermalization design of small F -number refractive-diffractive telephoto objective lens in infrared dual-band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(14): 1422002.
- [17] 陈潇. 大相对孔径变焦红外光学系统无热化设计[J]. *红外技术*, 2021, 43(12): 1183-1187.
Chen X. Athermalization of infrared zoom optical system with large relative aperture[J]. *Infrared Technology*, 2021, 43(12): 1183-1187.

Design of Infrared Dual-Band Confocal Composite Aperture Optical System

Dang Gengming, Gao Ming*, Fan Chen, Chen Yang

School of Opto-electronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China

Abstract

Objective Traditional photoelectric reconnaissance equipment belongs to the single-aperture optical system, but the single-aperture optical system cannot effectively obtain the depth, precise position, and velocity of the target. In addition, although the resolution of the telephoto system in a single-aperture optical system is high, and the detection distance is far, the field-of-view angle for detection is small. Thus, it is difficult to carry out a real-time search in a wide area. Moreover, wide-angle cameras are usually short in focus and low in resolution and are not suitable for remote target detection and recognition. As a consequence, the single-aperture optical system cannot achieve a large field-of-view and high resolution at the same time, thereby being unable to give full play to the parallel processing ability. The single-band optical system is subject to the influence of external factors such as light and poor anti-interference performance and cannot achieve all-weather target detection. Given the above background, a dual-band composite aperture optical system is proposed in this paper.

Methods This paper analyzes the design concept of the composite aperture optical system and calculates its relevant design data by building a mathematical model for the field-of-view stitching. The conditions of the dual-band confocal and common image plane are analyzed to ensure the synchronization and consistency of image acquisition in different bands. Through the theoretical calculation of the relay image conversion system, the problem that the curved image formed by the composite aperture system cannot match with the plane detector is solved, and the composite aperture optical system is finally designed. The imaging wavebands of the composite aperture optical system consist of the medium wave infrared waveband and long wave infrared waveband. The main and subordinate apertures are used to cooperate with detection and search. The main aperture is used for remote detection, and the subordinate aperture is used for large field-of-view searches to achieve wide-area and long-distance detection.

Results and Discussions First of all, the front end of the composite aperture optical system is composed of a main sub-eye and four subordinate sub-eyes to improve the field of view and detection distance of the system. The main aperture is for the telephoto high-resolution identification of the target, and the subordinate aperture is for the large field-of-view detection and search of the target. In addition, the system can achieve all-weather detection and identification of the target in complex environments due to its medium wave/long wave infrared common optical path design. Finally, the design scheme of the relay image conversion system is selected through comparison and demonstration to solve the problem of image plane matching in the composite aperture system. The relay image conversion system can convert the focal curve image plane of the composite aperture system into a focal plane image, which can be received and collected by the photodetector. The design indexes of the main aperture system (Table 3) can meet the requirement of the 20-km long-range detection of the system, and the design indexes of the four subordinate aperture systems (Table 4) can satisfy the

large field-of-view search requirement of the system. According to related design theory and models of the composite aperture system, the design indexes of the system (Table 2) and the relay image conversion system (Table 5) can be calculated.

Conclusions The composite aperture optical system designed in this paper consists of a main sub-eye and four subordinate sub-eyes. The imaging bands are 3.7–4.8 μm and 7.7–9.5 μm . The main aperture system has a focal length of 200 mm, a field-of-view angle of $\pm 6^\circ$, and a detection distance of up to 20 km. The subordinate aperture system has a focal length of 50 mm and a field-of-view angle of $\pm 12^\circ$. The optical axis angle of the main and subordinate apertures is 6° , and the combined total field-of-view angle is 24° . The imaging quality of the main and subordinate aperture systems and the relay receiving system is good, and there is no thermal difference in the temperature range of -40°C to 60°C . Compared with the homo-type composite aperture system, the system has the characteristics of long-range detection, wide-field-of-view search, and good adaptability to temperature change and has broad application prospects in long-range detection and identification, military reconnaissance, and other fields.

Key words optical design; infrared dual band; composite aperture; common focal length