

多波段光谱接收与可见光成像共孔径光学系统设计

彭礼威, 陈宇*, 董大鹏, 谭勇

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 为满足对飞行目标的多维光谱探测和可见光成像需求, 设计了一款基于卡塞格林望远镜结构的共孔径光学系统。系统前端由同轴两反系统组成, 主镜为抛物面, 次镜为双曲面, 后端通过平板分光的方式由各子系统接收。在可见光成像端, 利用两片柱面镜成功解决了分光平板引起的像散问题, 并通过添加反向倾斜的补偿平板, 校正了分光平板引起的光轴偏移问题, 可实现对距离为 0.5~1.5 km、直径为 0.5 m 的飞行目标进行可见光成像和多波段光谱接收 (200~400 nm、400~760 nm 及 760~2 500 nm)。成像模块各视场在奈奎斯特频率 35 lp/mm 处均实现了 $MTF > 0.5$, 趋近于衍射受限曲线, 各光谱接收模块也均满足光纤耦合要求。通过无热化设计, 该共孔径系统可实现在 -20~50 °C 温度范围内正常工作。公差分析结果表明, 该系统能够满足实际加工和装调要求。

关键词: 光学设计; 卡塞格林望远镜; 共孔径; 多波段

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220142

Design of a common aperture optical system for multiband spectral reception and visible imaging

Peng Liwei, Chen Yu*, Dong Dapeng, Tan Yong

(School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: To meet the requirements of multidimensional spectral detection and visible-light imaging of flight targets, a common-aperture optical system based on the Cassegrain telescope was designed. The front end of the system was composed of bi-reflective system. The primary mirror is a paraboloid and the secondary mirror is a hyperboloid. The light beam in the back end was split by tilted flat plates and received by the following subsystems. The problem of astigmatism caused by tilted flat plates was solved successfully by utilizing two cylindrical lenses in the visible-light imaging system. The deviation of the optical axis caused by the tilted flat plate was compensated by adding reversed tilted flat plates. Visible-light imaging and mutispectrum (200-400 nm, 400-760 nm and 760-2 500 nm) reception could be realized for flying targets with diameters less than 0.5 m within 0.5-1.5 km. The MTF values of each field of view in the imaging module were all greater than 0.5 at a Nyquist frequency of 35 lp/mm. This result is extremely close to the diffraction limit curve. All coupling modules meet the coupling requirements of optical fibers. Through athermal design, the common-aperture system can work normally in the temperature range from -20 °C to 50 °C. The tolerance analysis results show that the system can meet the requirements of manufacture, installation and adjustment.

Key words: optical design; Cassegrain telescope; common-aperture; muti-waveband

收稿日期: 2022-03-14; 修订日期: 2022-05-11

基金项目: 吉林省科技发展计划 (20190303108 SF)

作者简介: 彭礼威, 男, 硕士生, 主要从事光学设计方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 陈宇, 男, 副教授, 博士, 主要从事光学系统设计、图像处理及机器视觉等方面的研究。

0 引言

在工业检测和军事应用中,除了目标的可见光图像信息之外,有时还需要对目标的光谱信息进行采集,以此获得更加丰富的探测数据。但仅将多个光学系统进行拼接来进行探测作业,整体系统的体积较大、制造成本相较偏高,且难以保证系统在时间与空间上的一致性,因此,多波段共孔径光学系统应运而生^[1]。常用共孔径结构由共用前置光路、分光元件及独立后置光路三部分组成。其中,前置光路的实现方式包括卡塞格林式光学结构、离轴三反式光学结构或折射透镜组;分光元件包括棱镜、分光平板等;后置光路一般由多个单独镜头外加能够响应不同波段的探测器组成^[2]。

2016年, Mahmoud Alaaeldin 等设计的可见/红外共孔径光学系统的工作波段为 0.5~0.7 μm 和 0.9~1.7 μm,其遮拦比为 0.35,较大,且主镜口径仅为 134 mm^[3]。2017年,贾冰设计了多谱段共孔径跟踪/引导系统,该系统由同轴两反系统、分束镜与折射透镜组组成,将可见光系统与高测量精度的激光系统相结合,虽然系统结构相对紧凑,但是工作波段仅为可见光,且未涉及无热化问题,设计难度较低^[4]。2019年,

Xin Liu 等设计了一款可见/长波红外共孔径的光学系统,其采用离轴三反结构解决了同轴两反系统的中心遮拦问题,但加工和装调难度较大^[5]。2020年,韩培仙设计了可见/中波双波段共孔径光学系统,系统采用四片 45°反射镜组成反射光路,虽在一定程度上减小了系统的尺寸,但未对系统进行无热化设计^[6]。2021年,马占鹏等设计了可见/红外双色共孔径光学系统,系统对分光平板进行偏心处理,进一步提高了系统的成像质量,但系统的口径较小,仅为 150 mm,且遮拦比相对较大,达到了 0.46^[7]。

目前,在国内外可查询的公开报道中尚未发现工作波段为 200~2500 nm 的宽波段共孔径消热差系统。

1 工作原理及指标分析

1.1 系统工作原理

系统的光学载荷搭载在双轴转台上,由跟踪系统、多波段光谱接收和可见光成像共孔径系统、长波红外探测系统三部分组成,实现对飞行目标的跟踪、成像、宽光谱信息提取及长波红外热成像等功能,其工作原理图如图 1 所示。

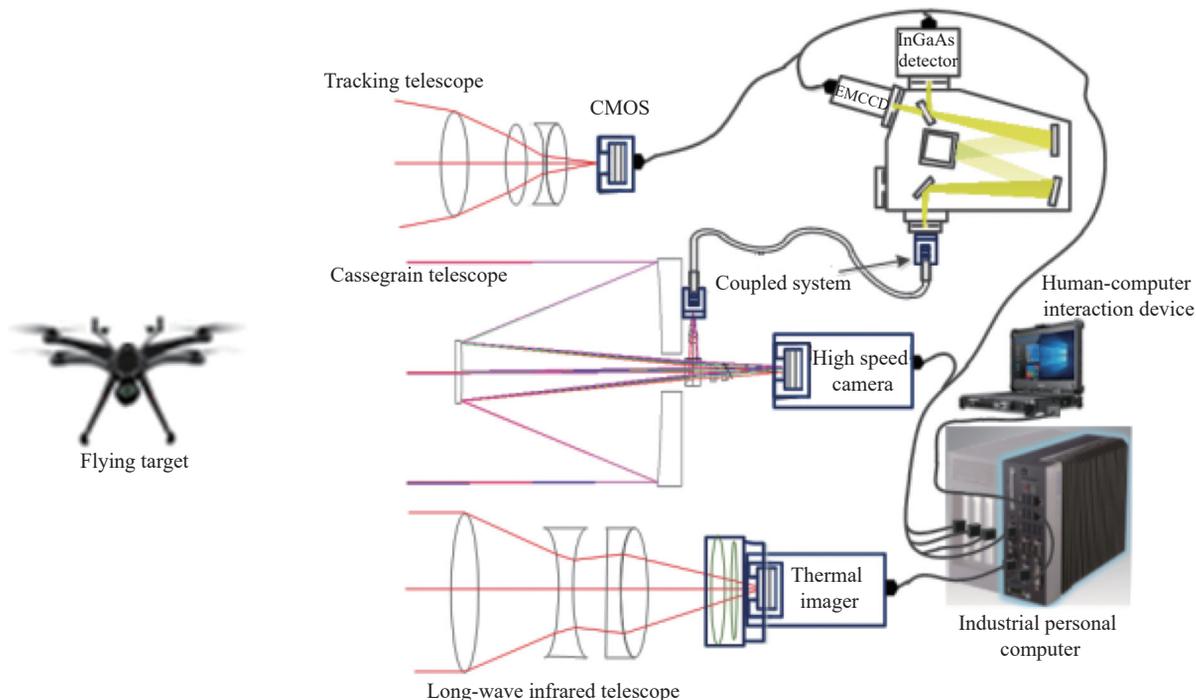


图 1 光学载荷工作原理图

Fig.1 Working principle diagram of optical load

系统工作时,首先由大视场跟踪系统对目标进行捕捉,然后将跟踪系统的焦段调至长焦,利用小视场锁定目标后,由长波红外探测系统记录目标的热像信息。同时,多波段光谱接收与可见光成像共孔径系统后端的高速摄像机对目标进行可见光成像并记录存储。目标发出的光谱信息(200~2500 nm)分别由紫外、可见、短波红外光谱接收系统接收。其中,短波红外光谱接收系统的像面通过光纤($\Phi 1.5\text{ mm}$, $NA=0.22$)耦合至红外光谱仪,紫外及可见光谱接收系统的像面分别经光纤耦合系统合束后输入至另一光谱仪中。两光谱仪获取的光谱信号输入至工控机后进行信息处理,进而获得更丰富的目标探测信息。

文中根据任务要求,设计了一种折反式多波段共孔径光学系统,系统共孔径部分采用卡塞格林系统光路结构,后端为可见光成像模块和各光谱接收模块的

折射镜组,通过平板分光的方式彼此相连。由于各光谱接收模块属于能量系统,相对于包含分光平板的成像模块,其设计难度较低。因此,在设计整套光学系统时,先对可见光成像模块进行设计,再结合系统前端的同轴两反结构参数,完成光谱接收模块后续光学组件的设计。重点对多波段光谱接收与可见光成像共孔径系统进行了参数分析计算、光学系统的优化设计及公差分析,并完成了满足光学无热化要求的机械结构设计,使该系统具备了工程可行性基础。

1.2 主要技术指标分析

根据多波段共孔径系统的设计需求,制定该系统技术指标如表 1 所示。设计中,高速摄像机的像元阵列为 $1\ 024 \times 1\ 024$,像元尺寸为 $14.6\ \mu\text{m} \times 14.6\ \mu\text{m}$ 。与各光谱接收系统衔接的光纤,数值孔径(NA)为 0.22,纤芯直径为 $1\ 500\ \mu\text{m}$ 。

表 1 技术指标要求

Tab.1 Technical specifications

Sequence number	Technical index	Requirement
1	Working waveband of imaging system/nm	400-760
2	Working waveband of ultraviolet spectrum-receiving system/nm	200-400
3	Working waveband of visible spectrum-receiving system/nm	400-760
4	Working waveband of short-wave infrared spectrum-receiving system/nm	760-2500
5	Entrance pupil diameter/mm	210
6	Object distance/km	0.5-1.5
7	Object size/m	$\Phi 0.5$
8	Temperature range/ $^{\circ}\text{C}$	-20-50
9	MTF	$\geq 0.35@35\ \text{lp/mm}$

光学系统的成像模块的焦距受探测器的参数限制,综合考虑系统结构长度限制及对目标放大观察的需求,将成像模块的焦距定为 $2\ 000\ \text{mm}$ 。根据半像高 y' 和成像模块焦距 f' 可计算出成像模块的半视场角 ω 为:

$$\omega = \arctan(y'/f') = \arctan\left(\frac{\sqrt{2} \times 1\ 024 \times 14.6 \times 10^{-3}}{2 \times 2\ 000}\right) = 0.3028 \quad (1)$$

由光纤的数值孔径 $NA=n\sin U=0.22$ 可得,满足光纤耦合的临界孔径角 $U=12.7^{\circ}$,其正切值可表示为入瞳半口径与光谱接收模块焦距 f'_0 的比值。为满足光纤耦合要求,光谱接收模块的像方孔径角需小于等于

该临界孔径角,故可得:

$$f'_0 \geq D/2 \tan 12.7^{\circ} = \frac{105}{\tan 12.7^{\circ}} = 465.9\ \text{mm} \quad (2)$$

同时考虑跟踪系统存在 $0.3\ \text{mrad}$ 的跟踪误差,会导致跟踪图像在光学系统视场范围内存在一定程度的抖动。光谱接收模块的全像高 $2y'_0$ 应小于等于光纤的纤芯直径 $1.5\ \text{mm}$,根据物像关系可得:

$$2y'_0 = \frac{Mf'_0}{L} \leq 1.5\ \text{mm} \quad (3)$$

式中: L 为物距; M 为物面图像尺寸。目标在 $L=500\ \text{m}$ 处时最容易脱离跟踪系统的视场,因此光谱耦合系统的视场角可由此确定。 $\Phi 0.5\ \text{m}$ 的目标

在 500 m 处的图像尺寸 (含抖动量) 为: $M=2 \times (0.3 \times 10^{-3} \text{ rad} \times 500 \text{ m} + 0.25 \text{ m}) = 0.8 \text{ m}$, 此时, 可得光谱接收模块的最小视场为 $\omega_s = \arctan\left(\frac{M}{2L}\right) = \arctan\left(\frac{0.8}{2 \times 500}\right) = 0.0458$, 则由公式 (3) 得:

$$f_0' \leq \frac{1.5L}{M} = 937.5 \text{ mm} \quad (4)$$

结合公式 (2)、(4) 可知, 光谱接收模块的焦距范围为 465.9~937.5 mm。设计中, 各光谱接收模块的焦距 f_0' 均取 650 mm。

2 系统设计与优化

2.1 同轴两反系统初始结构计算

对于同轴两反系统, 系统的孔径光阑位于主镜, 已知系统的入瞳直径为 210 mm, 可预设遮拦比 α 为 0.3。

$$\alpha = \frac{h_2}{h_1} \quad (5)$$

式中: h_1 、 h_2 分别为主镜和次镜的半口径。主、次镜的曲率半径 R_1 、 R_2 及间隔 d 可由公式 (6)~(8) 求得^[8-9]:

$$R_1 = 2f_1' \quad (6)$$

$$R_2 = \frac{\alpha\beta}{1+\beta}R_1 \quad (7)$$

$$d = f_1'(1-\alpha) \quad (8)$$

式中: β 为次镜的放大倍率; f_1' 为主镜的焦距。经典卡塞格林系统仅能消除球差, 主镜为抛物面, 则主镜的偏心率 $e_1^2=1$ 。根据初级像差理论, 可以推导出^[10]:

$$S_1 = \left[\frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4} - \frac{\alpha(\beta+1)^3}{4}e_2^2 \right] - \frac{\beta^3}{4}(1-e_1^2) \quad (9)$$

式中: e_2^2 为次镜的偏心率; S_1 代表球差系数。当球差为 0 时, 且主镜的偏心率 $e_1^2=1$, 则次镜的偏心率可表示为:

$$e_2^2 = \frac{(\beta-1)^2}{(\beta+1)^2} \quad (10)$$

次镜的偏心率 e_2^2 受其放大倍率 β 的影响较大, e_2^2 越小, 次镜越容易加工, 但此时次镜的公差会越严格^[11], 综合权衡后 β 取 -5.0, 主镜的顶点半径 R_1 初始取值为 -750, 代入公式 (6)、(7)、(8)、(10) 可得 f_1' 、 R_2 、 d 、 e_2^2 分别为 -375、-281.25、-262.5、2.25, 求得的前端卡塞格林望远镜初始结构如图 2 所示。

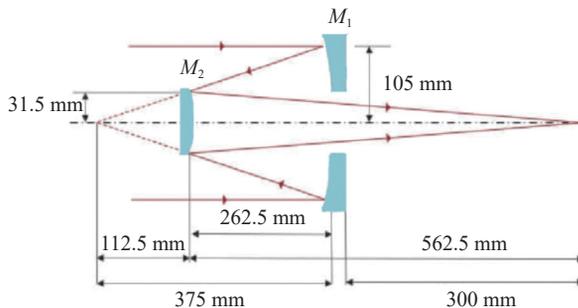


图 2 卡塞格林望远镜初始结构

Fig.2 Initial structure of Cassegrain Telescope

2.2 分光布局设计

光束经前端的同轴两反系统反射后, 进入多路分光系统。针对波段范围为 200~2500 nm, 采用三块分光平板进行分光。分光元件常用的有分光平板和分光棱镜, 系统中的分光元件未采用分光棱镜, 主要原因在于分光膜设计难度极大, 且胶合面对紫外、红外波段吸收较为严重, 基本上不具有工程可行性。相对而言, 分光平板的采用缓解了分光膜设计难度, 且无需胶合, 但另一方面分光平板会导致光轴偏移以及产生像散, 这也为成像系统的设计带来了新的难度。分光平板布局图如图 3 所示。

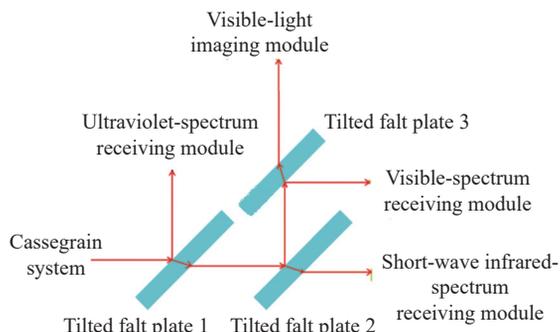


图 3 分光平板布局图

Fig.3 Layout of plate beam-splitters

图 3 中, 分光平板 1~3 与光轴的夹角均为 45°。分光平板 1 反射 200~400 nm 紫外波段, 透射 400~2500 nm 波段; 分光平板 2 反射 400~760 nm 波段, 透射 760~2500 nm 波段; 分光平板 3 对 400~760 nm 波段可见光实现 5:5 分光。

2.3 成像模块的优化设计

2.3.1 沿轴像散校正

卡塞格林系统后端采用分光平板会造成成像光

束的子午焦点和弧矢焦点的不重合,产生沿轴像散。在成像系统光路引入分光平板后,子午像面和弧矢像面均会产生焦移,两者焦移量的差值即为分光平板的沿轴像散^[12],如图 4 所示。则分光平板的沿轴像散 B_{ASTI} :

$$B_{ASTI} = \Delta L_Y - \Delta L_X \quad (11)$$

式中: ΔL_Y 为子午方向的焦移量; ΔL_X 为弧矢方向的焦移量。为了对成像系统的子午焦点和弧矢焦点进行像散补偿,加入两个凸面方向相互垂直放置的柱面镜,并加入三片球面透镜消除残余像差。

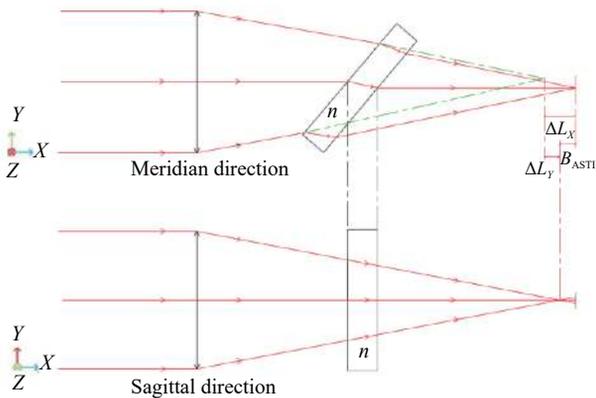


图 4 分光平板引入的轴上像散示意图

Fig.4 Schematic diagram of on-axis astigmatism introduced by plate beam-splitter

2.3.2 光轴偏移量校正

成像系统的光束经过倾斜的分光平板后会产生光轴偏移,从而严重影响成像质量。因此,采用反向倾斜放置的一块补偿平板对光轴的偏移量进行校正,光轴偏移补偿示意图如图 5 所示。

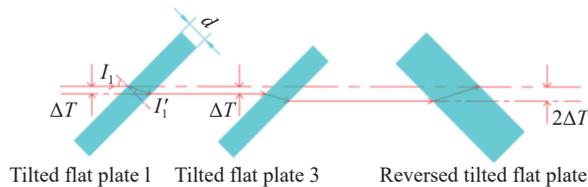


图 5 光轴偏移示意图

Fig.5 Schematic diagram of optical axis deviation

光轴偏移量可表示为^[13]:

$$\Delta T = d \sin I_1 \left(1 - \frac{\cos I_1}{n \cos I_1'} \right) \quad (12)$$

其中,分光平板 1、3 的厚度均为 10 mm,且入射角为 45°,可由公式 (12) 求得光轴偏移量为 -3.4 mm,反向倾斜 45°放置的补偿平板的厚度为 20 mm,其光轴偏移量为 6.8 mm。

2.3.3 消热差系统优化

当环境温度发生变化时,光学系统的镜片、镜筒等均会发生一定程度的热变形,导致热离焦现象。该光学系统需要在 -20~50 °C 范围内实现较好的成像质量和较高的耦合效率,因此必须对光学系统进行无热化设计。

整套系统的最前端使用一块材料为融石英的防尘平板玻璃,用于保护后面的光学元件,其处于平行光路中,不产生任何像差。由于理想像面位置会随着物距或温度的变化而变化,为补偿物距和温度变化引起的像质改变,系统的像面需具有对焦功能。先对温度为 20 °C、物距为 1000 m 的成像系统进行设计,其次利用多重组态,将物距拓展为 500~1500 m,再次进行优化,使系统在温度为 20 °C、物距在 500~1500 m 范围内变化时成像良好;最后,将系统的温度变化范围拓展为 -20~50 °C,进行无热化设计,确保温度在 -20~50 °C、物距在 500~1500 m 范围内变化,系统始终具有良好成像质量,且各透镜厚度合理,能够满足后期工艺制造要求。优化后的可见光成像模块的结构如图 6 所示,其中补偿平板后的第一、二两片透镜为平凸柱面镜,第一柱面镜前表面的凸面方向在子午方向,第二柱面镜前表面的凸面方向为弧矢方向。

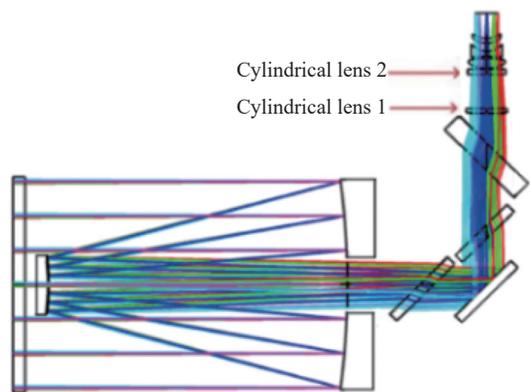


图 6 可见光成像模块光学结构

Fig.6 Structure of visible-light imaging module

物距和温度变化产生的像面漂移总量约为 5.717 mm。通过在一定距离下对不同温度对应的像

面位置进行采样,可拟合出像面漂移量关于温度及物距的函数曲线并进行编程,由电机驱动改变后截距进行像面补偿。

2.3.4 成像模块的像质评价

由于该模块并不是一个旋转对称的系统,故在视场设置上,除 0°视场外,子午和弧矢方向视场分别设置为 0.21°、0.3028°共五个视场。对于可见光成像模块,相机的像元尺寸大小为 14.6 μm×14.6 μm,根据奈奎斯特采样定律^[14],可得出截止频率为 35 lp/mm。

图 7~图 9 分别为 -20 °C、20 °C 和 50 °C 时,可见光成

像模块的探测距离分别为 500 m、1000 m 和 1500 m 时对应的 MTF 曲线图。

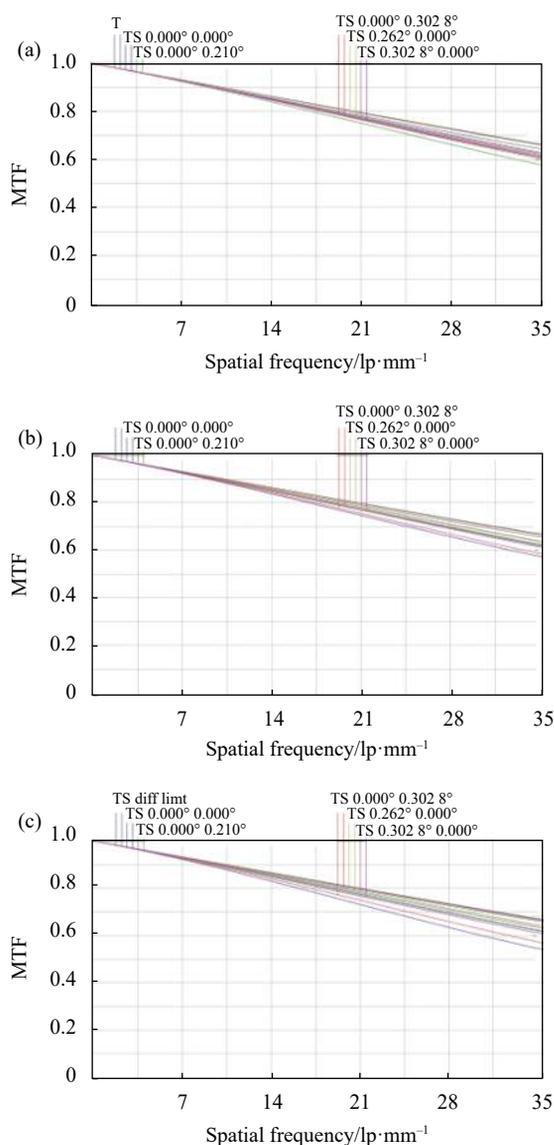


图 7 -20 °C 时,不同探测距离下成像模块的 MTF 曲线。(a) 500 m; (b) 1000 m; (c) 1500 m

Fig.7 MTF curves of the imaging module at different detection distances at -20 °C. (a) 500 m; (b) 1000 m; (c) 1500 m

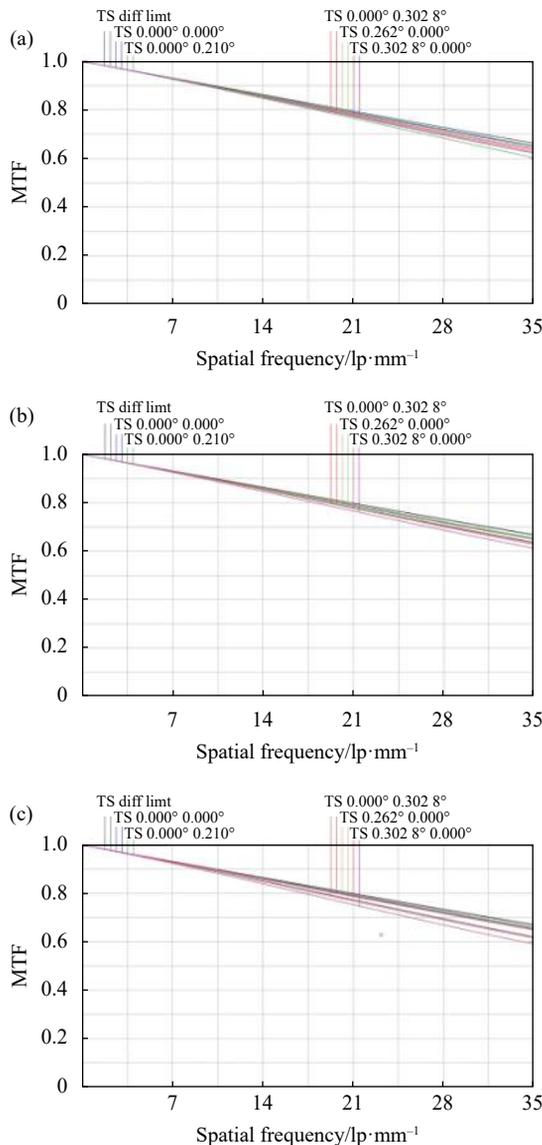
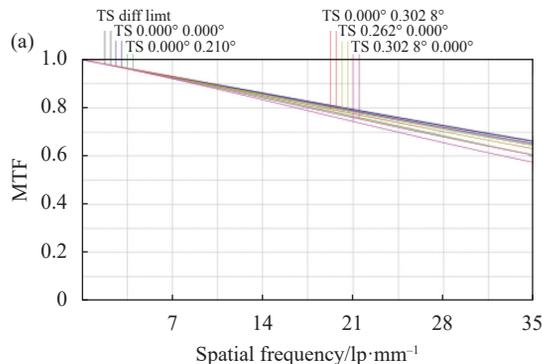


图 8 20 °C 时,不同探测距离下成像模块的 MTF 曲线。(a) 500 m; (b) 1000 m; (c) 1500 m

Fig.8 MTF curves of the imaging module at different detection distances at 20 °C. (a) 500 m; (b) 1000 m; (c) 1500 m



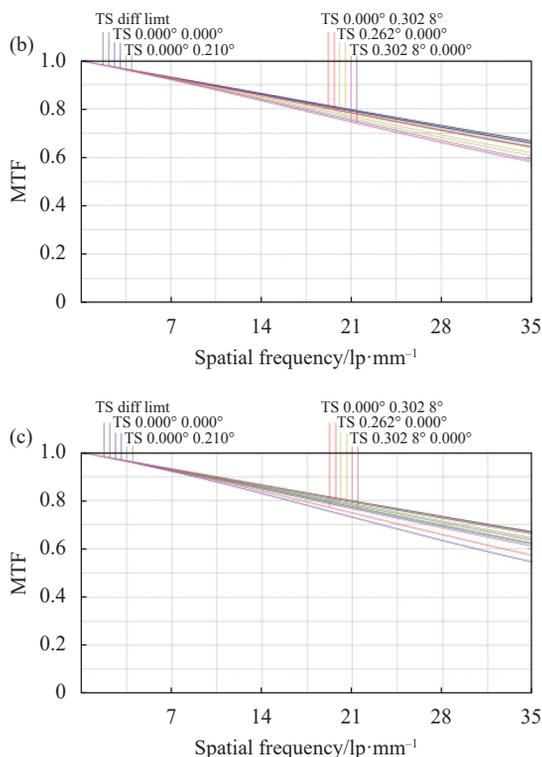


图 9 50 °C 时,不同探测距离下成像模块的 MTF 曲线。(a) 500 m; (b) 1000 m; (c) 1500 m

Fig.9 MTF curves of the imaging module at different detection distances at 50 °C. (a) 500 m; (b) 1000 m; (c) 1500 m

由图 7~图 9 可知,在未考虑成像模块公差的情况下,探测距离为 500 m、1000 m 和 1500 m 时(不同温度状态),成像模块的调制传递函数(MTF)在 35 lp/mm 均优于 0.5,且像质稳定,满足系统设计指标要求。

2.4 光谱接收模块的优化设计

光谱接收模块的波段范围为 200~2500 nm,由于波段范围较宽,将其分为紫外光谱接收模块(200~400 nm)、可见光谱接收模块(400~760 nm)和短波红外光谱接收模块(760~2500 nm)进行设计。考虑到理想像面位置会随着物距或温度的变化而变化,且光谱接收模块调焦及定标困难,故光谱接收模块均采用像面固定的方式进行系统设计。首先根据各端光束透过分光平板后的通光口径和出射角度,在 ZEMAX 库中寻找合适的初始结构,然后利用 Zemax 软件,针对各支路,设计工作温度为 20 °C、物距为 1000 m 的光谱接收模块;其次利用多重组态,将该模块的物距范

围扩展为 500~1500 m,并对该模块进行优化,使其在温度为 20 °C 时,物距在 500~1500 m 范围内变化时始终可以满足系统指标;最后,将该模块的温度变化范围拓展为 -20~50 °C,进行无热化设计,确保温度在 -20~50 °C 时,物距在 500~1500 m 范围内变化,各支光路均能满足像高小于纤芯直径(1.5 mm)、且像方孔径角小于 12.7°的光纤耦合要求。

对于可见光谱接收模块,光束经过分光平板 1 后,光轴会发生微量偏移^[15],由公式(12)可计算出光轴偏移量为 -3.4 mm;同理,对于短波红外光谱接收模块,光线经过分光平板 1、2 后光轴也存在一定量的偏移,由公式(12)可计算出光轴偏移量为 -6.8 mm。在系统的子午方向,对可见光和短波红外光谱接收模块进行相应的偏心处理,使得像高与像方孔径角均在要求范围内,且留有一定的余量。设计完成后,紫外、可见与短波红外光谱接收折射镜组分别如图 10(a)~(c)所示。

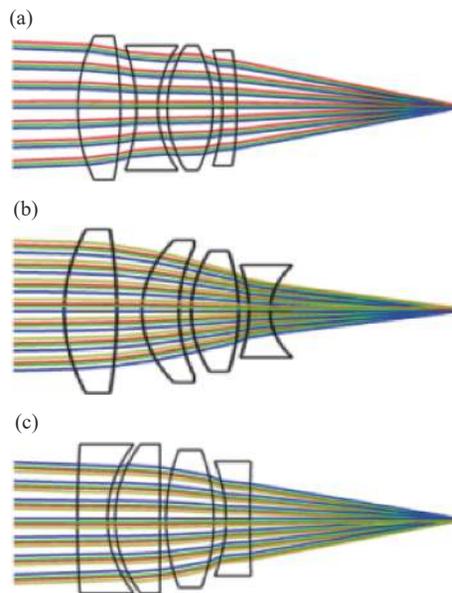


图 10 各光谱接收折射镜组。(a) 紫外光谱折射镜组; (b) 可见光谱折射镜组; (c) 短波红外光谱折射镜组

Fig.10 Different spectra-receiving refractor group. (a) Ultraviolet refractor group; (b) Visible-light refractor group; (c) Short-wave infrared refractor group

将各光谱接收模块与可见光成像模块组合,形成系统总体光学结构如图 11 所示。

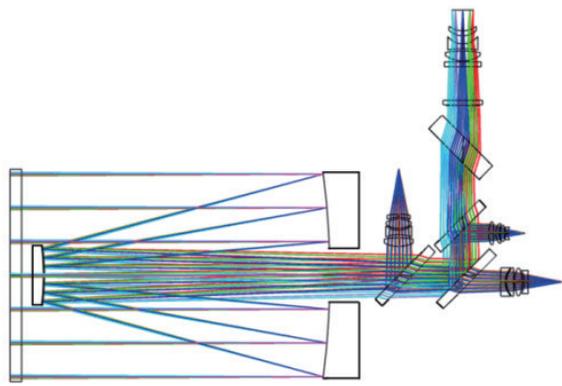


图 11 光学结构图

Fig.11 Structure of the optics system

2.5 光谱接收模块的像质分析

对于光谱接收模块(前端共孔径部分与后端各光谱折射镜组合),当系统的像高小于纤芯直径,且边缘视场的像方孔径角小于光纤的数值孔径角时,可认为从各光谱接收模块出射的光线均可耦合进光纤,系统总的耦合效率由光学系统的透过率及光纤内部的能量损耗共同决定。紫外、可见、短波红外光谱接收模块在极端环境温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,物距范围为 $500\sim 1500\text{ m}$ 所对应的全像高与像方孔径角如图 12、图 13 所示。

由图 12、图 13 可知,在极端温度 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$

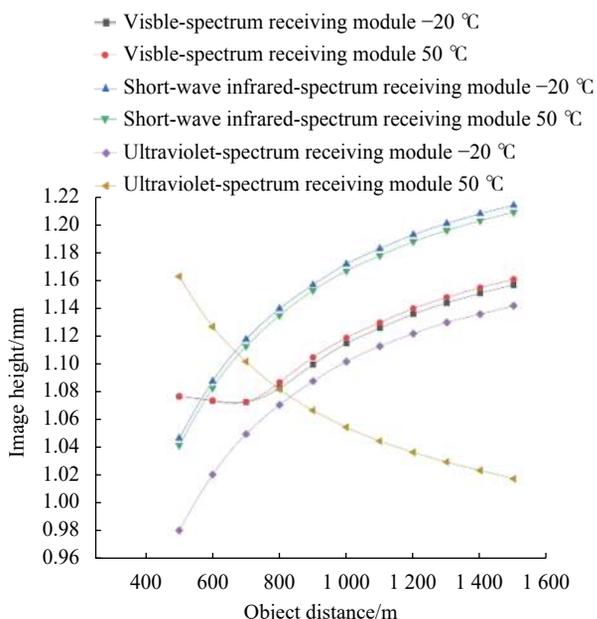


图 12 极端温度下,各光谱接收模块在不同物距时对应的全像高
Fig.12 Full image heights of each spectral-receiving module with different object distances at extreme temperature

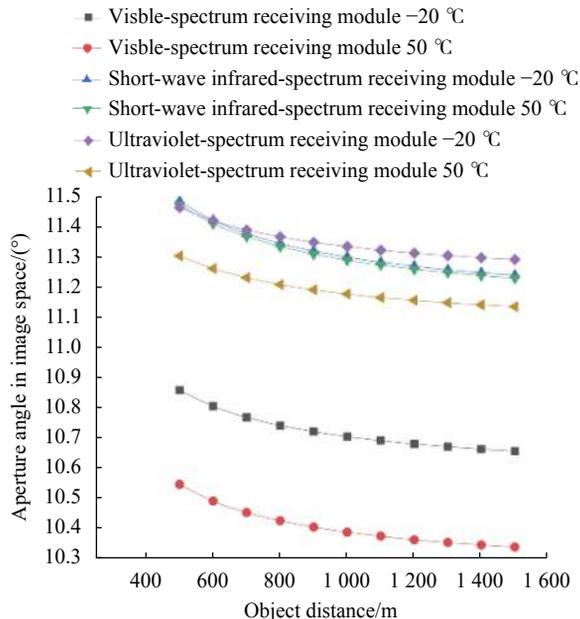


图 13 极端温度下,各光谱接收模块在不同物距时对应的像方孔径角
Fig.13 Aperture angle in image space of each spectral-receiving module with different object distances at extreme temperature

时,紫外、可见和短波红外光谱接收模块在物距范围 $500\sim 1500\text{ m}$ 情况下对应的像高均小于 1.5 mm ,像方孔径角均小于 12.7° ,像高与像方孔径角均满足要求且留有较大余量,提高了系统的容差性。

3 公差分析

公差分析是为光机零件加工和组件装调提供精度控制参考值^[16]。公差分配不合理会增大加工难度及成本。经公差分析,满足系统成像及光纤耦合要求的元件的加工公差和装调公差分别如表 2 和表 3 所示。

由于系统采用共孔径的形式,系统主次镜的倾斜和偏心公差对系统的成像质量影响较大,因此主次镜的面型精度要求较为严格,不宜采用光圈的形式,而采用 RMS 面型误差为作为公差分析标准。系统中,主次镜的 RMS 面型误差为 $\lambda/50@633\text{ nm}$,其他光学元件的 RMS 面型误差为 $\lambda/10@633\text{ nm}$ 。采用“MTF 衍射平均值”模式为公差分析的评价标准,并利用蒙特卡洛法对 1000 组镜头数据进行分析,由于篇幅限制,文中仅给出可见光成像模块物距为 1000 m 时的分析结果,如表 4 所示。

由表 4 可知,在给定的公差范围内,可见光成像

表 2 元件的加工公差

Tab.2 Machining tolerance for components

Items	Parameter
Fringes	±1.5
Thickness/mm	±0.06
Surface tilt	±1
Surface decenter/mm	±0.02

表 3 元件的装调公差

Tab.3 Assembly and adjustment tolerance for components

Items	Parameter
Interval/mm	±0.06
Eccentric element/mm	±0.02
Element tilt/(°)	±1

表 4 成像模块公差分析结果

Tab.4 Tolerance analysis results of imaging module

Title	Result
Traceable Monte Carlo generation number	1000
The name of the MTF value	0.650
The average MTF	0.521
MTF value of 98% lens	>0.352
MTF value of 90% lens	>0.386
MTF value of 80% lens	>0.413
MTF value of 50% lens	>0.487
MTF value of 20% lens	>0.556
MTF value of 10% lens	>0.580
MTF value of 2% lens	>0.608

模块有 98% 的概率使其 MTF 在 35 lp/mm 处大于 0.352, 满足设计指标要求。

对于光谱接收模块, 采用“评价函数”模式作为公差分析的评价标准。鉴于该模块为非旋转对称系统, 利用操作数 RAID 和 REAY 计算正负边缘视场各工作波长入射光在像面上的入射角及像高, 并结合 OPLT 操作数实际约束各入射角及像高均小于其临界值。

各光谱接收模块均采用与可见光成像模块相同的公差, 对物距为 500 m、1000 m 和 1500 m 的三个组

态进行 1000 组蒙特卡洛分析。分析结果表明, 当各光谱接收模块公差满足限制要求时, 98% 以上系统的评价函数值均为 0, 表明系统的公差能够满足光纤耦合要求。

4 结构无热化设计

由于系统具有共孔径的特点, 主次镜受环境温度变化而产生的热变形量对后面各子系统影响较大, 因此在进行无热化设计时, 应优先考虑主次镜的材料。若想减弱温度对反射镜面型的影响, 反射镜材料需具有热膨胀系数小、弹性模量小、热导率大、比重小、刚度高等特点。目前, 常用的光学反射镜材料有微晶玻璃 (Zerodur)、碳化硅 (SiC) 和超低膨胀玻璃 (ULE) 等^[17], 考虑到微晶玻璃的线膨胀系数小, 仅为 $7 \times 10^{-7} \sim 11 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$, 可有效减小反射镜面型的热变形量, 因此反射镜材料选择微晶玻璃。在温度变化时, 反射镜及反射镜支架都会发生径向方向的热胀冷缩, 由于结构件材料与反射镜材料的热膨胀性能不匹配, 会产生径向热应力, 从而严重影响镜面面型^[18]。为了确保主次镜同轴度, 将主镜座与次镜之间通过圆周均布的三个连接杆和连杆后座连接。连杆后座固定在主镜座法兰上, 连接杆前端安装座固定在次镜座上。其中连接杆材料选择与微晶玻璃的线膨胀系数相接近的殷钢, 主次镜座材料为钛合金并采用柔性结构, 提高温度的适应性。将主次镜数据导入到有限元分析软件中, 在极端温度下分析其面型的热变化量, 主镜和次镜在极端温度下面型的热变化云图分别如图 14、图 15 所示。

由分析结果可知, 主镜在 50 °C 时最大变形量约为 2.45 μm; -20 °C 最大变形量向内收缩, 其值约为 3.26 μm; 次镜在 50 °C 时最大变形量约为 8.93 μm; -20 °C 最大变形量向内收缩, 其值约为 8.05 μm; 主镜和次镜在温度变化范围内面型的热变化量远小于配合公差, 可见温度变化不会影响主次镜特性。为了抑制杂散光, 将遮光罩固定在支撑板法兰上, 前窗口玻璃用压圈固定在遮光罩上, 遮光罩采用碳纤维材质, 与主镜座及窗口玻璃之间加 5 mm 厚聚酰亚胺垫隔热安装, 降低遮光罩因温度变化时对主光路的影响, 最终得到系统的机械结构如图 16 所示。

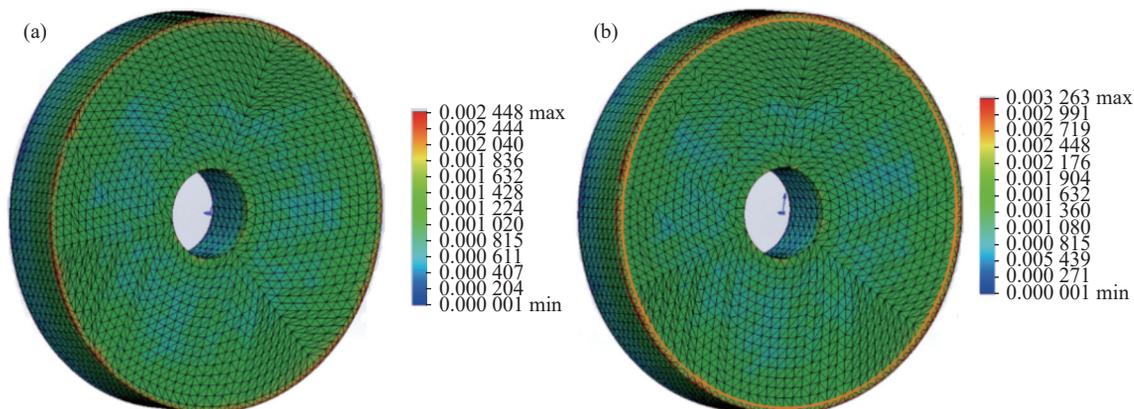


图 14 极端温度下主镜的形变分析结果。(a) 50 °C; (b) -20 °C

Fig.14 Results of deformation analysis of primary mirror at extreme temperature. (a) 50 °C; (b) -20 °C

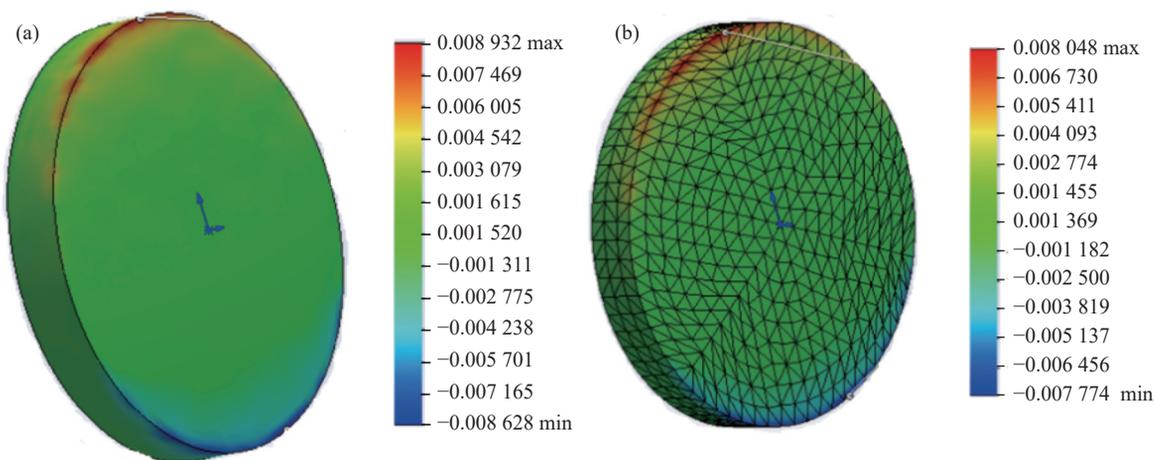


图 15 极端温度下次镜的形变分析结果。(a) 50 °C; (b) -20 °C

Fig.15 Results of deformation analysis of secondary mirror at extreme temperature. (a) 50 °C; (b) -20 °C

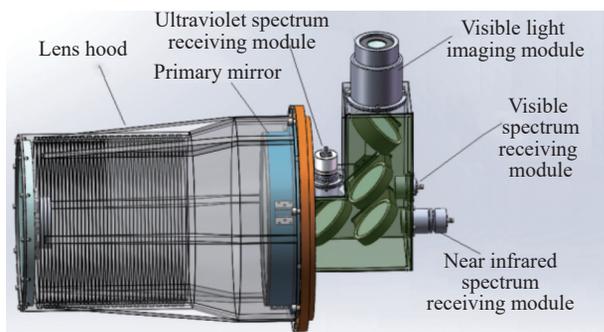


图 16 系统机械结构图

Fig.16 Mechanical structure of the system

5 结 论

设计了一种多波段光谱接收与可见光成像共孔径光学系统。可见光成像光路中加入分光平板会引

入轴上像散和光轴偏移,采用柱面镜对轴上像散进行校正,并反向倾斜放置补偿平板进行光轴偏移补偿,有效地提升了系统的成像质量。通过无热化设计,使得系统在物距 500~1 500 m、温度-20~50 °C 范围时,可见光成像模块具有良好的成像质量,各光谱接收模块具有较高的耦合效率。经公差分析,可见光成像模块与光谱接收模块均可满足设计指标,且系统结构紧凑,利于系统实现小型化、轻量化。该设计具有较强的工程实用性,对多波段共孔径探测系统设计具有一定的指导意义。若与高共轴性激光发射系统组合,该共孔径系统还可应用于激光定向能毁伤等领域。

参考文献:

[1] Shao Shuai. Integrated design of optical- mechanism and heat for shared aperture infrared system with multi-spectrum band

- [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(2): 387-393. (in Chinese)
- [2] Li Xiaohu. Research on the structure of multiband shared aperture imaging system based on the consistency of the fields of view[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Precision Machinery and physics, Chinese Academy of Sciences (University of Chinese Academy of Sciences), 2016. (in Chinese)
- [3] Mahmoud A, Xu D, Xu L J. Optical design of common aperture and high resolution electro electro-optical/infrared system for aerial imaging applications [C]//SPIE, 2016, 9880: 98801G.
- [4] Jia bing, Cao guohua, Ding hongchang, et al. Optical design of tracking/guiding system with multi-spectrum and common aperture [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0218001. (in Chinese)
- [5] Liu X, Chang J, Feng S, et al. Optical design of common-aperture multispectral and polarization optical imaging system with wide field of view [J]. *Chinese Physics B*, 2019, 28(8): 084201.
- [6] Han Peixian, Ren Ge, Liu Yong, et al. Optical design of VIS/MWIR dual-band common- aperture system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(3): 435-440. (in Chinese)
- [7] Ma Zhanpeng, Xue Yaoke, Shen Yang, et al. Design and realization of visible/LWIR dual-color common aperture optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(5): 0511002. (in Chinese)
- [8] Yu Linyao, Wei Qun, Zhang Tianyi, et al. Design of long focal infrared catadioptric optical system for multi-guided system [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 234-240. (in Chinese)
- [9] Guo Shengnan. The design of common aperture multi-band optical system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [10] Xue Qinsheng. Optical design and stray light analysis for large aperture catadioptricstar sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0222001. (in Chinese)
- [11] Li Jing, Che Ying, Wang Jiaan, et al. Optical system design for multi-spectral laser radar with refraction and reflection in co-path [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0510008. (in Chinese)
- [12] Liu Zhiying, Zheng Qiushui, Li Wenbo, et al. Optical system of tilted beam splitter type multicolor autocollimator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(4): 682-690. (in Chinese)
- [13] Wang Wensheng, Liu Dongmei, Chen Yu, et al. Applied Optics[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2019. (in Chinese)
- [14] Guo Yulin. Design of cassegrain non-focus coaxial common-path optical system[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2018. (in Chinese)
- [15] Gao Xudong, Cui Qingfeng, Zheng Hanqing, et al. Athermalization design of deep ultraviolet optical system with wide temperature range [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(17): 17220111. (in Chinese)
- [16] Hao Siyuan, Xie Jianan, Wen Maoxing, et al. Design and realization of light and small long-wave infrared optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(9): 20200031. (in Chinese)
- [17] Hu Yang, Li Li, Jia Xuezhi. Optimal design of lightweight off-axis mirror and flexible support [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 49(19): 11923002. (in Chinese)
- [18] Zhang Sichen, Li Zhuo, Gao Yanze, et al. Design of optical system for infrared scene projection in cryogenic environment [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(14): 1422003. (in Chinese)