

激光与光电子学进展

可见光/红外共口径模块化光学系统设计

王保华*, 张绪国, 封宇航, 李阳

北京空间机电研究所, 北京 100094

摘要 针对战场态势感知、环境污染监测以及应急减灾等领域对全天候、全天时遥感信息的应用需求,提出了一种可见光/红外一体化空间遥感成像方案,工作谱段覆盖可见光全色/多光谱、中波红外和长波红外,不同谱段的空间分辨率分别可达到为 2 m/8 m、8 m 和 16 m,成像幅宽大于 15 km。分析确定了光学系统技术指标参数,提出了可见光/红外共口径模块化光学系统设计方案,完成了各模块光学系统和整体光学系统的设计与分析。设计结果表明,各模块光学系统和整体光学系统的成像质量均接近衍射极限,各模块光学系统可进行单独装调和测试评价,有利于实现可见光/红外复杂光学系统的模块化研制,有效降低多谱段、多焦距、一体化复杂光学系统的研制难度和研制周期,具有较高的工程应用价值。

关键词 光学设计与制造; 光学遥感; 可见光/红外; 共口径; 模块化

中图分类号 O439 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213198

Design of Visible/Infrared Common-Aperture Modular Optical System

Wang Baohua*, Zhang Xuguo, Feng Yuhang, Li Yang

Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China

Abstract A visible/infrared integrated space remote-sensing imaging scheme is proposed in this study to satisfy the all-weather and all-day remote-sensing application requirements in the fields of battlefield situation awareness, environmental pollution monitoring, and emergency disaster reduction. The proposed system covers visible panchromatic/multispectral, middle-wave and long-wave infrared spectral bands. The spatial resolution of the aforementioned spectral bands can reach 2 m/8 m, 8 m, and 16 m, respectively, and the imaging width exceeds 15 km. The technical parameters of the optical system are analyzed and determined, and the design scheme of the visible/infrared common-aperture modular optical system is proposed. The design and analysis of each module of the optical system and the entire optical system are realized. The design results show that the imaging quality of each module of the optical system and the entire optical system is close to the diffraction limit. Each module can be assembled and tested separately, facilitating the modularization development of the visible light/infrared complex optical system. The complexity and time taken for development of the multispectral, multifocal, integrated optical system can be effectively reduced. Therefore, the visible/infrared common-aperture modular optical system has a significant engineering application value.

Key words optical design and fabrication; remote sensing; visible/infrared; common aperture; modulization

1 引言

随着航天技术的发展和遥感数据应用的不断深入,单一的可见光或红外谱段已不能完全满足战场态势感知、环境污染监测以及应急减灾等军事和民用领域的应用需求,利用可见光、中波红外和长波红外谱段的探测优势进行复合成像可以提升遥感器的探测能力和探测精度,实现全天候、全天时遥感信息获取,因此,

多谱段一体化成像逐渐成为国内外空间光学遥感器的发展趋势。多谱段一体化成像遥感器的光学系统通常采用共用部分光路的设计方案,例如郭钰琳等^[1]设计的可见光/中波红外光学系统共用卡塞格林反射系统,经分色片分光后再通过可见光和中波红外透镜组分别实现可见光和中波红外谱段的焦距和成像要求;李昌瑞等^[2]设计的可见光/中波红外光学系统共用一套离轴三反系统实现可见光谱段长焦要求,中波红外谱段

收稿日期: 2021-11-10; 修回日期: 2021-12-12; 录用日期: 2021-12-17; 网络首发日期: 2021-12-28

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0500501)

通信作者: *wangbaohua508@163.com

经分色片分光后再利用第二套离轴三反中继系统实现短焦要求;赵艳华等^[3]设计的高分五号全谱段光谱成像仪光学系统的各谱段共用离轴主镜和离轴次镜,经视场分光后再利用两个离轴三镜分别实现可见光-短中波和长波红外两个通道成像。上述多谱段一体化光学系统在设计时均采用整体设计思路,即共用的部分光学系统与各谱段中继系统整体满足设计要求,但共用的部分光学系统和各谱段中继系统均不能独立完成成像,因此,光学系统只能在装调完成后进行整体成像性能评价,当多谱段一体化光学系统的光学元件尤其是离轴反射镜数量较多时会给整体装调测试工作带来很大的困难^[4],也将增加光学系统的研制周期和研制成本。

针对多谱段一体化成像遥感器的应用需求,本文提出了可见光全色/多光谱、中波红外和长波红外空间遥感成像方案,同时获取可见光、中波红外和长波红外遥感信息,分析确定了光学系统技术指标,为了解决当前多谱段一体化复杂光学系统的设计和装调测试难题,本文提出了一种可见光/红外共口径模块化光学系统设计,完成了共口径模块化光学系统设计,主光学系统模块、各谱段中继系统模块和整体光学系统成像质量均接近衍射极限,可实现复杂光学系统的模块化设计、装调和测试评价,有效降低多谱段、多焦距、一体化光学系统的研制难度和研制周期。可见光全色/多光谱、中波红外和长波红外共口径模块化光学系统布局合理紧凑,具有很高的工程应用价值,可用于军事目标侦查、环境污染监测、自然灾害及突发事件快响成像等,满足一星多用、全天时、全天候成像的应用需求。

2 光学系统指标分析

可见光全色/多光谱、中波红外和长波红外一体化遥感器的工作谱段包括 1 个可见光全色谱段(PAN: 0.45~0.90 μm)、4 个可见光多光谱谱段(B1-B4: 0.45~0.52 μm 、0.52~0.59 μm 、0.63~0.69 μm 、0.77~0.89 μm)、1 个中波红外谱段(MWIR: 3~5 μm)和 1 个长波红外谱段(LWIR: 8~10 μm),采用推扫成像模式,工作轨道高度为 400 km,在可见光全色谱段、可见光多光谱谱段、中波红外谱段、长波红外谱段的空间分辨率分别达到 2、8、8、16 m,成像幅宽大于 15 km。

可见光全色/多光谱谱段的探测器选用 TDI CMOS 器件,其中全色谱段的像元尺寸为 10 μm × 10 μm ,4 个多光谱谱段的像元尺寸为 40 μm × 40 μm ;中波红外和长波红外谱段探测器均选用 HgCdTe 焦平面器件,像元尺寸均为 20 μm × 20 μm 。根据遥感成像原理,由探测器像元尺寸、空间分辨率、轨道高度可计算得到可见光全色/多光谱谱段、中波红外谱段、长波红外谱段的焦距分别为 2000、1000、500 mm;由轨道高度、成像幅宽可计算得到视场角为 2.14°,取 2.2°进行光学系统设计。

光学系统的相对孔径对遥感器的信噪比(SNR)/噪声等效温差(NETD)和调制传递函数(MTF)有很大影响,同时还决定光学系统的体积和工程难度。光学系统的相对孔径通常需要根据遥感器的成像质量和性能综合分析确定,当可见光/红外一体化遥感器可见光全色谱段在典型观测条件下的 SNR 优于 45 dB、中波红外和长波红外谱段的噪声等效温差优于 0.1 K 时,根据信噪比/噪声等效温差计算公式可计算得到可见光、中波红外和长波红外谱段对应的相对孔径分别为 1/10、1/5 和 1/2.5,预估可见光全色谱段、可见光多光谱谱段、中波红外谱段和长波红外谱段在奈奎斯特频率处的 MTF 衍射极限分别为 0.55、0.85、0.38 和 0.31,光学系统经详细设计、加工和装调后的 MTF 可以满足遥感应应用需求。最终得到可见光/红外一体化遥感器光学系统的技术指标参数如表 1 所示。

表 1 光学系统技术指标
Table 1 Specifications of optical system

Specification	Value
Spectral band / μm	PAN: 0.45-0.90
	B1: 0.45-0.52
	B2: 0.52-0.59
	B3: 0.63-0.69
	B4: 0.77-0.89
	MWIR: 3-5
	LWIR: 8-10
Field of view / (°)	2.2
Focal length / mm	PAN, B1-B4: 2000
	MWIR: 1000
	LWIR: 500
<i>F</i> number	PAN, B1-B4: 10
	MWIR: 5
	LWIR: 2.5
Detector pixel size / μm	PAN: 10 × 10
	B1-B4: 40 × 40
	MWIR: 20 × 20
	LWIR: 20 × 20

3 光学系统设计方案

由于不同工作谱段自身辐射能量和探测器性能等方面的限制,多谱段一体化成像遥感器在可见光和红外谱段往往具有不同的焦距,不同的工作谱段无法完全共用一套光学系统实现全部的焦距要求,因此,多谱段一体化光学系统在设计时通常采用共用部分主光学系统加多套中继系统的设计方案。本文提出的可见光/红外一体化遥感器在可见光全色/多光谱谱段、中波红外谱段和长波红外谱段的焦距均不一致,采用传统设计方案将导致光学系统非常复杂,装调测试难度大、周期长。为了实现可见光/红外一体化遥感器光学系统的技术指标要求,并降低光学系统的设计、装调和

测试难度,本文提出了一种可见光/红外共口径模块化光学系统设计方案,如图 1 所示,整体光学系统由主光学系统、分色片 1、分色片 2 和各谱段中继系统组成,各谱段共用主光学系统,经分色片 beam splitter 1 和 beam splitter 2 分成 3 个成像通道,再经各谱段中继系统后分别成像在探测器上,因此,整体光学系统可分成 4 个成像模块:主光学系统、可见光中继系统、中波红外

中继系统和长波红外中继系统,主光学系统与各谱段中继系统满足光瞳匹配原则,即主光学系统的出瞳与中继光学系统的入瞳口径、位置一致。主光学系统和各谱段中继系统均通过独立设计达到优良的像质,从而可进行模块化的装调和测试评价,从而大幅降低整体光学系统的装调和测试难度,有利于缩短研制周期和降低研制成本。

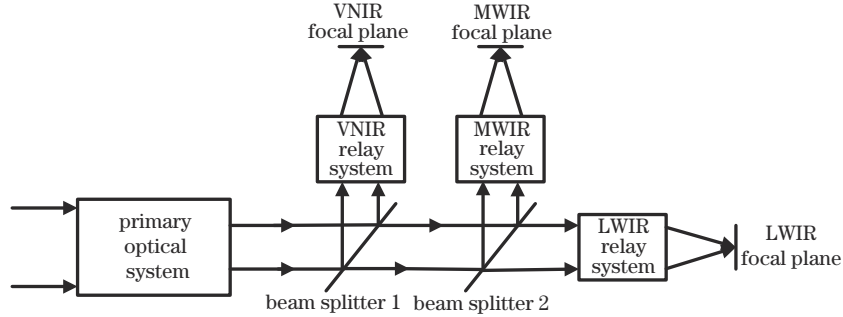


图 1 共口径模块化光学系统设计方案

Fig. 1 Design schematic of common aperture modular optical system

可见光/红外共口径模块化光学系统的主光学系统模块用来压缩入瞳口径,整体光学系统的焦距与主光学系统的口径压缩比、各谱段中继光学系统的焦距的关系为^[5]

$$f'_i = \beta \times f'_{\text{relay}}, \quad (1)$$

式中: f'_i 为整体光学系统各谱段的焦距; β 为主光学系统的口径压缩比; f'_{relay} 为各谱段中继系统的焦距。

整体光学系统的视场角与主光学系统的口径压缩比、各谱段中继系统的视场角的关系为

$$\omega = \omega_{\text{relay}} / \beta, \quad (2)$$

式中: ω 为整体光学系统的半视场角; β 为主光学系统的口径压缩比; ω_{relay} 为各谱段中继系统的半视场角。

由式(1)和式(2)可以看到,在整体光学系统的焦距和视场角一定的情况下,中继系统的焦距和视场角与主光学系统的口径压缩比相关,主光学系统的口径压缩比越大,中继光学系统的焦距越短,视场角越大,因此,主光学系统的口径压缩比需根据入瞳直径、焦距、视场角等指标综合确定,既充分考虑主光学系统和各谱段中继光学系统的设计难度,又有利于实现整体光学系统的轻量化设计。

4 光学系统设计结果与分析

4.1 主光学系统

主光学系统不具有光焦度,主要用来压缩光学系统的入瞳口径,从而减小中继光学系统设计难度和光学元件尺寸。主光学系统的成像谱段覆盖可见光、中波红外和长波红外谱段,采用反射系统才能实现宽谱段消色差设计,并综合考虑视场角、口径压缩比、出瞳位置等因素,主光学系统优选 Cook 型离轴三反结构形式^[6]。离轴反射系统的初始结构通常由同轴系统离轴

后得到,因此,首先需要分析和计算得到同轴系统的结构参数。具有中间像面的同轴三反无焦系统的结构形式如图 2 所示,其参数主要包括:主镜、次镜、三镜的顶点曲率半径 R_1 、 R_2 和 R_3 ; 主次镜间距 d_1 、次三镜间距 d_2 , 主三镜间距 d_{13} ; 光学系统入瞳口径 D , 出瞳口径 D' ; 主镜、次镜和三镜的焦距 f'_1 、 f'_2 和 f'_3 ; l_1 代表主镜的物距, l_2 代表次镜的物距, l'_2 代表次镜的像距, l_3 代表三镜的物距。

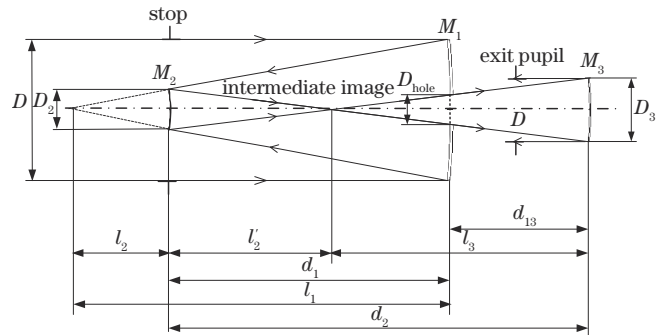


图 2 具有中间像面的同轴三反无焦系统结构

Fig. 2 Schematic of coaxial three-mirror afocal system with intermediate image

设主镜垂轴放大倍率为 β_1 , 次镜对主镜的线遮拦比为 α_2 , 次镜垂轴放大倍率为 β_2 , 三镜对次镜的线遮拦比为 α_3 , 三镜垂轴放大倍率为 β_3 , 它们之间满足以下关系^[7-8]:

$$\beta_i = \frac{l'_i}{l_i} \quad (i = 1, 2, 3), \quad (3)$$

$$\alpha_2 = \frac{l_2}{f'_1} = \frac{2l_2}{R_1} \approx \frac{D_2}{D_1}, \quad (4)$$

$$\alpha_3 = \frac{l_3}{l'_2} \approx \frac{D_3}{D_2} \quad (5)$$

同轴三反光学系统由于存在次镜遮拦和主镜中心开孔导致有效通光口径减小,使得光学系统 MTF 值下降,因此需要对遮拦比和主镜中心孔的直径做一定的控制^[9-10]。通常情况下,次镜对主镜的遮拦比应小于 10%,本文假定次镜对主镜的遮拦比 $\alpha_2=0.1$,并假定主镜中心孔口径与次镜口径相同,将 $\alpha_2=0.1$ 代入式(4)得到 $D_2=D_{\text{hole}}=20 \text{ mm}$ 。

为了降低反射镜的加工难度,通常情况下反射镜的相对孔径需小于 1/2,假设主镜的相对孔径为 1/2,则主镜的焦距 $f'_1=400 \text{ mm}$,由几何关系可求得 $d_1=360 \text{ mm}$, $l_2=40 \text{ mm}$, $l'_2=180 \text{ mm}$ 。

薄透镜成像的物像关系式为^[11]

$$\frac{1}{l'_i} - \frac{1}{l_i} = \frac{1}{f'_i} \quad (i = 1, 2, 3), \quad (6)$$

将 l_2, l'_2 代入式(4)和式(6)可得次镜焦距 $f'_2=51.4 \text{ mm}$, $R_2=102.8 \text{ mm}$ 。

综合考虑各模块光学系统的设计难度、整体系统的体积和重量,将主光学系统的口径压缩比设计成 5 倍,根据几何光学理论可知主光学系统的出瞳 $D'=40 \text{ mm}$,由几何关系得到 $d_{13}=d_1/2=180 \text{ mm}$,即三镜焦距 $f'_3=360 \text{ mm}$,三镜顶点曲率半径 $R_3=720 \text{ mm}$ 。

至此,得到了同轴三无焦光学系统初始结构的所有参数,将同轴三反无焦光学系统的初始结构通过光阑离轴和视场离轴得到无遮拦的离轴系统,并将顶点曲率半径、镜间距以及非球面系数等设为变量,调整光学元件的偏心和倾斜对光学系统的像质、口径压缩比以及出瞳位置进行优化设计,最终得到无焦主光学系统光路如图 3(a)所示,体积仅为 $214 \text{ mm} \times 325 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}(X \times Y \times Z)$ 。分色片 1 采用熔融石英材料,前表面镀膜后将中波和长波红外谱段反射,可见光全色和多光谱谱段透射;分色片 2 采用锗材料,前表面镀膜后将中波红外谱段反射,长波红外谱段透射。主光学系统在成像视场范围内的 MTF 曲线如图 3(b)所示,各视场 MTF 值均接近衍射极限。

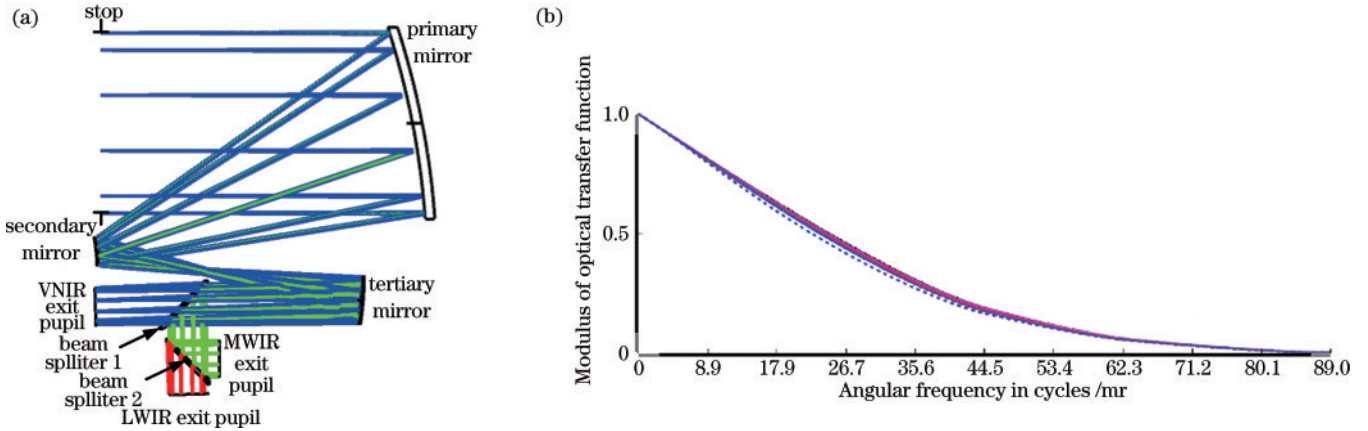


图 3 主光学系统光路和像质评价。(a) 光路图;(b) MTF 曲线

Fig. 3 Layout of primary optical system and image quality analysis. (a) Optical system layout; (b) MTF curve

4.2 可见光全色/多光谱谱段中继系统

将整体光学系统的视场角、可见光全色/多光谱谱段的焦距、主光学系统的口径压缩比代入式(1)和式(2),计算得到可见光全色/多光谱谱段中继系统的焦距为 400 mm ,幅宽方向的视场角为 11° ,根据全色多光谱谱段的探测器排布设置可见光全色/多光谱谱段中继系统在沿轨推扫方向的视场角为 2.15° 。可见光全色/多光谱谱段中继系统具有 5 个工作谱段,且焦距较长、视场角较大,采用透射系统将很难校正色差和二级光谱,因此,可见光全色/多光谱谱段中继系统采用离轴三反结构形式,为了与主光学系统进行光瞳匹配,设计时将孔径光阑设置在主镜前,光阑位置和大小与主光学系统的出瞳一致。经过优化设计后的可见光全色/多光谱谱段中继系统光路如图 4 所示,系统体积为 $130 \text{ mm} \times 113 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}(X \times Y \times Z)$ 。

以全色谱段(PAN)和第 4 多光谱谱段(B4)为例

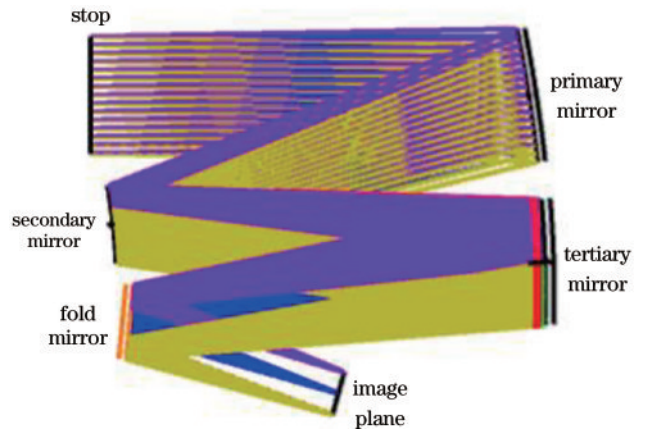


图 4 可见光全色/多光谱谱段中继系统光路图

Fig. 4 Layout of visible panchromatic/multispectral bands relay optical system

分析可见光全色/多光谱谱段中继系统的成像质量,光学系统的 MTF 曲线如图 5 所示,PAN 不同视场在奈

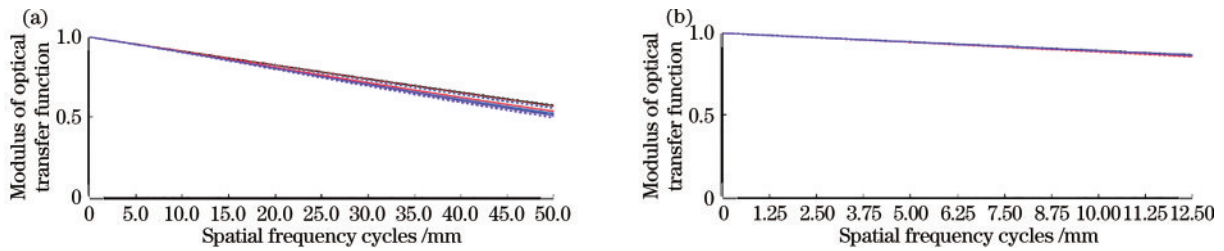


图 5 可见光全色/多光谱中继系统 MTF 曲线。(a) 全色谱段; (b) B4 谱段

Fig. 5 MTF curves of visible panchromatic/multispectral bands relay optical system. (a) PAN spectrum; (b) B4 spectrum

奈斯特频率(50 lp/mm)处的 MTF 值均优于 0.50, B4 不同视场在奈奎斯特频率(12.5 lp/mm)处的 MTF 值均优于 0.86, 成像质量均接近衍射极限。

4.3 中波红外谱段中继系统

将整体光学系统的视场角、中波红外谱段的焦距、主光学系统的口径压缩比代入式(1)和式(2), 计算得到中波红外谱段中继系统的焦距为 200 mm, 视场角为 11°。红外光学系统为了降低内杂散辐射通常需要设置冷光阑, 冷光阑的口径与光学系统的出瞳匹配^[12], 由

于中波红外谱段中继系统还要与主光学系统的出瞳匹配, 因此, 充分考虑后中波红外谱段中继系统选用具有中间像面的透射式结构形式。通过优化透镜顶点曲率半径、镜间距等参数实现了满足各项要求的中波红外通道中继光学系统设计, 光路图如图 6(a)所示, 共包含 6 片透镜和 1 片杜瓦窗口, 光学系统总长 250 mm。中波红外通道中继光学系统的 MTF 曲线如图 6(b)所示, 不同视场在奈奎斯特频率(25 lp/mm)处的 MTF 值均优于 0.3, 成像性能优异。

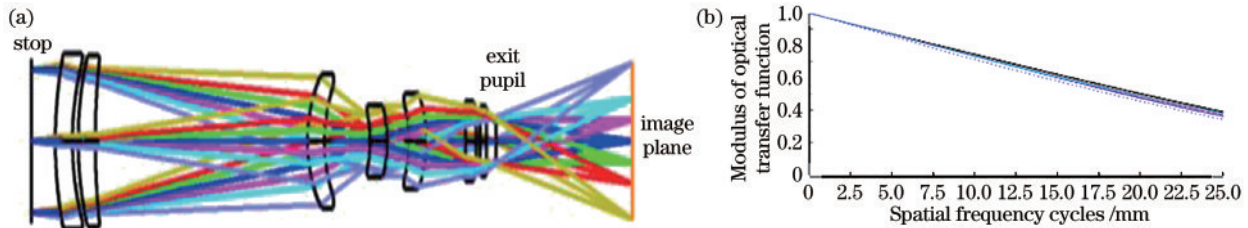


图 6 中波红外谱段中继系统光路和像质评价。(a) 光路图; (b) MTF 曲线

Fig. 6 Layout of middle-wave infrared spectral bands relay optical system and image quality analysis. (a) Optical system layout; (b) MTF curve

4.4 长波红外谱段中继系统

将整体光学系统的视场角、长波红外谱段的焦距、主光学系统的口径压缩比代入式(1)和式(2), 计算得到长波红外谱段中继系统的焦距为 100 mm, 视场角为 11°。长波红外谱段中继系统采用与中波红外谱段中继系统相同的透射式结构形式和设计方法, 由

于长波红外谱段相对孔径较大, 为了校正光学系统像差从而得到优良的像质, 在设计过程中引入了非球面, 优化设计后的长波红外谱段中继系统光路如图 7(a)所示, 共包含 6 片透镜、1 片平面折转镜和 1 片杜瓦窗口, 其中透镜 2 的前表面和透镜 4 的后表面为非球面, 光学系统总长 163 mm。长波红外谱段中继

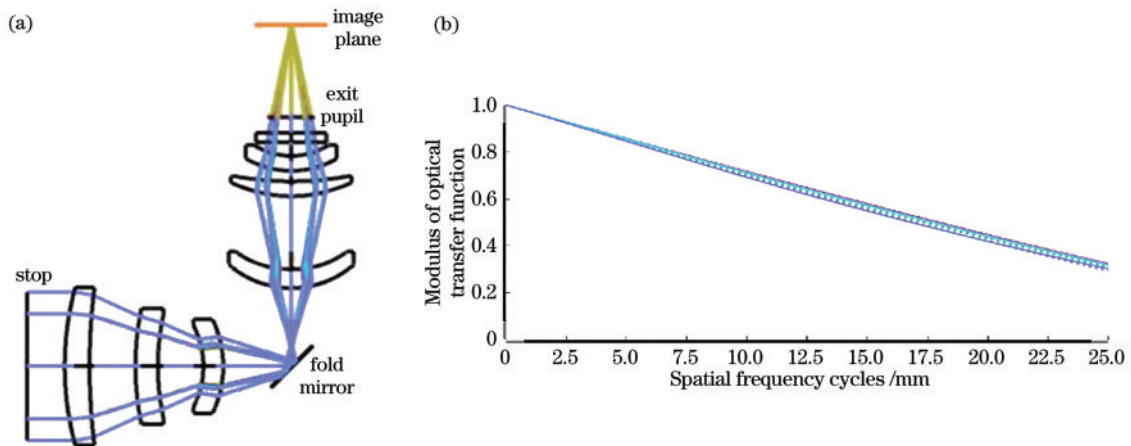


图 7 长波红外谱段中继系统光路和像质评价。(a) 光路图; (b) MTF 曲线

Fig. 7 Layout of long-wave infrared spectral bands relay optical system and image quality analysis. (a) Optical system layout; (b) MTF curve

系统的 MTF 曲线如图 7(b) 所示, 不同视场在奈奎斯特频率 (25 lp/mm) 处的 MTF 值均优于 0.3, 接近光学系统衍射极限。

4.5 整体光学系统

根据光瞳匹配原则将主光学系统与各波段中继系统连接成整体光学系统, 整体光学系统的光路如图 8 所示, 整体光学系统的体积仅为 214 mm × 490 mm × 530 mm (X × Y × Z), 光路布局简洁紧凑, 有利于实现小型化设计。

整体光学系统的 MTF 曲线如图 9 所示, 各波段在不同视场的 MTF 值均接近衍射极限, 与各波段中继光学系统单独成像时的 MTF 值基本一致, 该结果表明复杂光学系统采用共口径模块化的设计方案合理

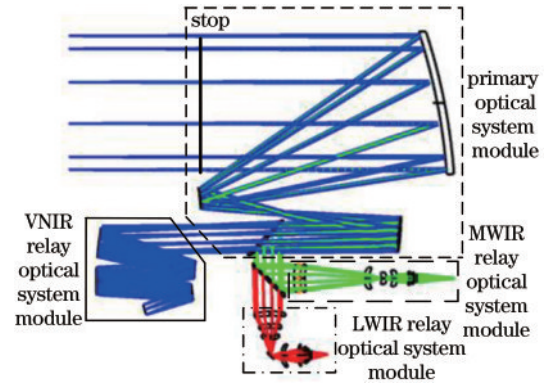


图 8 整体光学系统光路图

Fig. 8 Layout of integrated optical system

可靠。

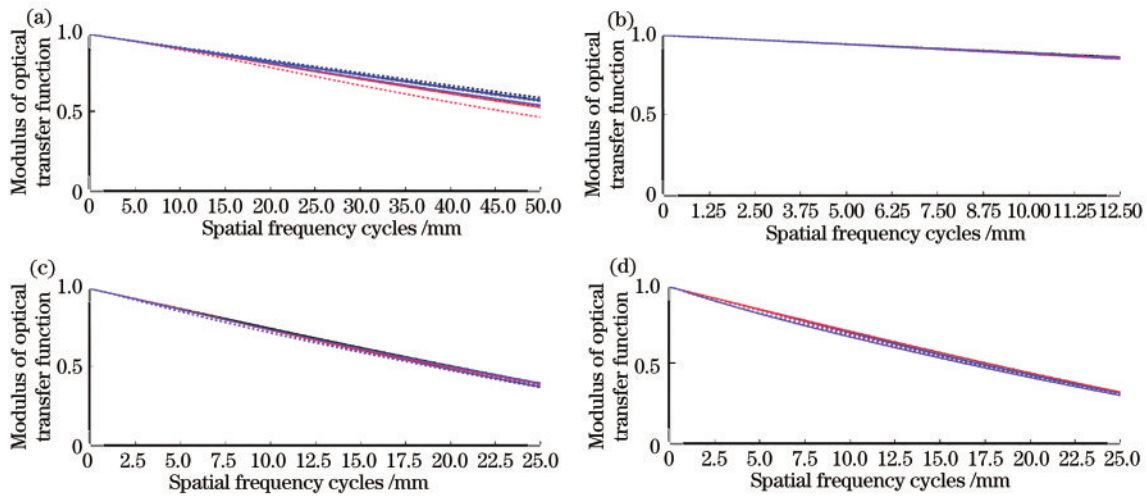


图 9 整体光学系统各波段 MTF 曲线。(a) PAN 谱段; (b) B4 谱段; (c) MWIR 谱段; (d) LWIR 谱段

Fig. 9 MTF curves of each spectral band of integrated optical system. (a) PAN spectrum; (b) B4 spectrum; (c) MWIR spectrum; (d) LWIR spectrum

5 结 论

为了满足战场态势感知、环境污染监测以及应急减灾等领域对全天候、全天时遥感信息的应用需求, 提出了包含可见光全色/多光谱、中波红外和长波红外共计 7 个波段的可见光/红外一体化空间遥感成像方案, 在可见光全色/多光谱、中波红外和长波红外波段的空分辨率分别为 2 m/8 m、8 m 和 16 m, 成像幅宽大于 15 km, 具有工作波段覆盖全、空间分辨率高、信噪比/噪声等效温差高等特点。分析确定了可见光/红外一体化遥感器光学系统的技术指标参数, 针对目前多波段一体化复杂光学系统研制难度大的问题, 创新性地提出了可见光/红外共口径模块化光学系统设计方案, 整体光学系统包括主光学系统和各波段中继光学系统共 4 个模块, 完成了主光学系统、各波段中继光学系统和整体光学系统的设计, 各模块光学系统成像质量均接近衍射极限, 各模块根据光瞳匹配原则集成后的整体光学系统成像质量基本无变化。设计结果表明, 可

见光/红外共口径模块化光学系统设计方案合理可行, 实现了复杂光学系统的模块化设计, 有利于降低整体光学系统的研制成本和研制周期, 设计的可见光/红外共口径模块化光学系统布局简洁紧凑, 具有较强的工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] 郭钰琳, 于洵, 蔡珂珺, 等. 可见光/中波红外双波段共口径光学系统设计[J]. 红外技术, 2018, 40(2): 125-132. Guo Y L, Yu X, Cai K J, et al. Optical design of TV/IR dual-band common-aperture system[J]. Infrared Technology, 2018, 40(2): 125-132.
- [2] 李瑞昌, 邹刚毅, 王臣臣, 等. 可见光与红外一体化光学系统设计[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0522002. Li R C, Zou G Y, Wang C C, et al. Optical design of visible and infrared integrative camera[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0522002.
- [3] 赵艳华, 戴立群, 白绍竣, 等. 全波段光谱成像仪系统设计及实现[J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(3): 38-50. Zhao Y H, Dai L Q, Bai S J, et al. Design and

- implementation of full-spectrum spectral imager system [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, 39(3): 38-50.
- [4] 钟兴, 马驰, 李艳杰, 等. 大视场离轴三反光学系统场曲特性与装调方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(9): 0922001. Zhong X, Ma C, Li Y J, et al. Field curvature characteristics and alignment method for the off-axis three-mirror optical system with wide field-of-view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0922001.
- [5] 张以谟. *应用光学*[M]. 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2015: 36-42. Zhang Y M. *Applied optics*[M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2015: 36-42.
- [6] Cook L G. Three mirror anastigmatic optical system: US4265510[P]. 1981-05-05.
- [7] 常军, 翁志成, 姜会林, 等. 用于空间的三反射镜光学系统设计[J]. *光学学报*, 2003, 23(2): 216-219. Chang J, Weng Z C, Jiang H L, et al. Design on three-reflective-mirror system used in space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(2): 216-219.
- [8] 陈太喜, 伍雁雄, 宋绍漫, 等. 折叠式离轴三反光学系统设计及装调[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(17): 1722001. Chen T X, Wu Y X, Song S M, et al. Design and alignment of folded off-axis three-mirror optical system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(17): 1722001.
- [9] 陈丽, 刘莉, 赵知诚, 等. 长焦距同轴四反射镜光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(1): 0108002. Chen L, Liu L, Zhao Z C, et al. Design of coaxial four-mirror anastigmat optical system with long focal length [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 0108002.
- [10] 孙永雪, 孙晖, 姜守望, 等. 立方星平台相机光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0522002. Sun Y X, Sun H, Jiang S W, et al. Optical system design of camera for Cubesat[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0522002.
- [11] 郁道银, 谈恒英. *工程光学*[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006: 20-38. Yu D Y, Tan H Y. *Engineering optics*[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006: 20-38.
- [12] 陈虹达, 薛常喜. 高变倍比小型化的中波红外光学系统设计[J]. *光学学报*, 2020, 40(2): 0222001. Chen H D, Xue C X. Design of mid-wave infrared optical system with high variable ratio miniaturization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(2): 0222001.