

共孔径多模遥感相机光学系统设计

彭礼威 张明磊 陈宇 蒋露松 董大鹏

Optical system design of common-aperture multimode remote sensing camera

Peng Liwei, Zhang Minglei, Chen Yu, Jiang Lusong, Dong Dapeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20230066>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

可见光全天时遥感相机光学系统设计

Optical system design of remote sensing camera with visible light all-day

红外与激光工程. 2020, 49(1): 0114003 <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0114003>

多波段共孔径光学成像系统的几种实现途径(特约)

Several ways to realize multi-band common aperture optical imaging system(*Invited*)

红外与激光工程. 2020, 49(6): 20201017 <https://doi.org/10.3788/IRLA20201017>

长焦距同轴四反射镜光学系统设计

Design of coaxial four-mirror anastigmat optical system with long focal length

红外与激光工程. 2019, 48(1): 118002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0118002>

同轴偏视场共孔径面阵成像光学系统设计

Design of common aperture coaxial field-bias optical system used in area array imaging sensor

红外与激光工程. 2018, 47(7): 718004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0718004>

多谱段共孔径跟踪/引导系统光学设计

Optical design of tracking/guiding system with multi-spectrum and common aperture

红外与激光工程. 2017, 46(2): 218001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0218001>

双通道离轴遥感相机高稳定性光机结构设计

High-stability opto-mechanical structure design of dual channel off-axis remote sensing camera

红外与激光工程. 2019, 48(4): 418005 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0418005>

共孔径多模遥感相机光学系统设计

彭礼威, 张明磊, 陈宇*, 蒋露松, 董大鹏

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了使遥感相机同时具备大视场搜索和多波段高分辨成像功能, 提出了一种成像与搜索模块一体化的遥感相机光学系统。大视场搜索模块采用离轴四反结构, 通过推扫的模式对目标区域进行扫描; 小视场成像模块通过次镜分光, 实现可见光和中波红外同时高分辨成像。各系统复用大口径主镜有效降低了遥感相机的体积和质量。当轨道高度为 500 km 时, 该系统可实现以 8 m 的地面分辨率对 33 km 线宽的地面进行推扫搜索, 确定目标后, 通过调整卫星姿态, 使可见光和中波红外成像模块分别以 0.45 m 和 3.2 m 的分辨率对地面目标进行高分辨凝视成像。公差分析结果表明, 可见光成像模块、中波红外成像模块以及搜索模块各视场的调制传递函数 (MTF) 分别在其奈奎斯特频率处 (133 lp/mm、20 lp/mm 和 33 lp/mm) 均大于 0.2。该系统能够满足实际加工和装调要求, 为实现紧凑型空间光学系统的设计提供了一种可行性方案。

关键词: 光学设计; 一体化光学系统; 遥感相机; 多波段

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230066

0 引言

空间遥感技术是利用卫星搭载可见光、红外等传感器, 收集地球表面和近地空间的电磁辐射数据, 并将其转变为所需的信号或图像^[1]。该技术广泛应用于军事侦察、摄影测绘、生态监测等领域。空间遥感相机是近年来的研究重点, 其遥测感知能力是高效率获取地球信息的关键^[2]。尤其是在卫星侦察领域, 需要空间遥感相机具备更宽的视场以及更高的分辨率, 以此获得敌方军事部署以及其他信息。然而, 受限于探测器像元尺寸和幅面大小, 如何设计出兼备大视场和高分辨率成像的紧凑型遥感相机具有一定难度, 也成为了国内外的研究热点。

在轨道高度一定的情况下, 相机的视场越大, 系统对地观测面积越大, 扫描周期越短, 可有效提高相机的广域搜索能力, 高分辨率成像通常是采用大口径的同轴光学结构实现, 然而大口径光学系统像差往往较大, 进而限制了视场大小。若采用大口径离轴

TMA 结构来获得较宽的视场, 则除了主镜外, 第三镜也需设计大口径来接收宽视场的光线。与同轴结构相比, 在相同的分辨率的情况下, 扩大视场会使得离轴结构的体积增大。

传统的光学系统完成大视场搜索和高分辨成像任务是通过两单独系统交互信息后配合完成的, 首先由大视场的系统对目标进行捕捉, 将目标的空间位置信息传递至高分辨率、小视场的系统对目标进行连续观测, 但两个单独的系统会使得整体结构变得十分笨重, 在空间有限的遥感相机上不易采用。另外, 传统的遥感卫星信息获取流程复杂、链路长, 有效信息的获取难以满足分钟级甚至秒级的获取需求^[3], 随着通遥一体化智能遥感卫星的方案提出, 其基于通信、导航、遥感等多载荷的集成于一体化协同布局构建而成的一种多功能卫星平台, 可快速提高空间信息获取、传输、处理和分发的能力^[4]。珞珈三号 01 星采用该方案并利用相关软件平台, 实现遥感数据的在轨实时处理, 同时, 其具备凝视成像、面阵推帧及面阵推扫

收稿日期: 2023-02-13; 修订日期: 2023-04-30

基金项目: 吉林省教育厅项目 (JKH20210821KJ)

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。

三种成像模式,可根据不同的任务进行工作模式的切换,为遥感卫星获取的信息具备一定的时效性奠定了基础。

2015 年,韩国的 Kompsat-3A 卫星^[5]中遥感相机采用了 Korsch 型光学结构,其焦距为 8.6 m,口径为 0.8 m,幅宽为 12 km,可获得 0.55 m 分辨率的可见光图像及 5.5 m 分辨率的红外图像。2015 年,我国的“吉林一号”光学 A 星搭载的高分辨率遥感相机采用同轴三反光学结构^[6],其焦距为 7.98 m,口径为 0.6 m,幅宽为 11.6 km,但其全色分辨率相对较低,仅优于 0.72 m。2018 年,赵宇宸设计了一款遥感光学载荷^[7],该系统的焦距为 2.5 m,口径为 0.4 m,视场为 0.6°×0.6°,其采用同轴三反光学结构并加入偏视场来消除二次遮拦,利用两平面反射镜折叠光路,然后利用两块分色镜将后端分为可见、近红外和中波红外通道,可分别获得 0.8、2.5、6.8 m 地面分辨率的可见光、近红外及中波红外图像。2019 年,孙永雪^[8]等人采用离轴三反结构设计了一款遥感相机,其焦距为 0.5 m,口径为 130 mm,视场为 5°×2°,采用共光路和分视场方式实现了可见光和微光探测器同时成像,但其可见光地面分辨率较低,仅为 3 m。2022 年,李庆林^[9]等人采用离轴三反结构设计了一款遥感相机,其焦距为 2.21 m,视场角为 8.8°,口径为 0.45 m,全色分辨率为 2 m。

由于目前大部分卫星所搭载的遥感相机不能同时兼备大视场探测和高分辨率识别,针对该问题,文中提出了一种具备大视场搜索和高分辨率成像的光学系统。高分辨率成像模块采用同轴折反式结构,可

提供 0.45 m 分辨率的可见光图像和 3.2 m 分辨率的中波红外波段图像。大视场搜索模块采用离轴四反结构,两模块通过共用主反射镜,可有效地减小系统的体积和质量,并能够同时满足大视场广域搜索和高分辨成像的需求。

1 技术指标

空间遥感相机的地面分辨率 G_{SD} 是由卫星轨道高度 H 、探测器像元尺寸 p 及光学系统的焦距 f' 共同决定的,其关系为^[10]:

$$G_{SD} = \frac{H \cdot p}{f'} \quad (1)$$

当 H 为 500 km 时,要求可见光成像模块、中波红外成像模块及可见光搜索模块的地面分辨率 G_{SD} 分别优于 0.45、3.2、8 m。另外,为了实现遥感相机的小型化及轻量化,光学系统的包络尺寸需小于 0.9 m×0.9 m×1.2 m,同时光学系统的质量需小于 200 kg。

该设计中,可见光搜索模块选用的探测器的像元尺寸为 15 μm×15 μm,像元阵列为 4096×4096;可见光成像模块采用探测器的像元尺寸为 3.76 μm×3.76 μm,像元阵列为 6252×4176;中波红外成像模块采用像元阵列为 384×288 的红外焦平面探测器,像元尺寸为 25 μm×25 μm。

由公式 (1) 可求得可见光成像模块、中波红外成像模块及可见光搜索模块的焦距至少分别为 4178 mm、3900 mm 和 937.5 mm。根据焦距、视场角和像高的三者关系,制定该系统技术指标如表 1 所示。

表 1 技术指标要求

Tab.1 Technical specification

Sequence number	Technical index	Visible-light imaging module	Medium-wave-infrared imaging module	Visible-light searching module
1	Wavelength/μm	0.45-0.9	3.7-4.8	0.45-0.9
2	Entrance pupil diameter/mm	800	800	130
3	Full field of view/(°)	0.4	0.4	10 (linear)
4	Effective focal length/mm	4200	4000	945
5	Ground resolution/m	≤0.45	≤3.2	≤8
6	MTF/lp·mm ⁻¹	≥0.2@133	≥0.2@20	≥0.2@33

2 光学系统设计

遥感相机在环绕地球飞行过程中,其与地面目标之间存在相对运动,可通过摆扫式、推扫式和凝视三种成像方式来获取地面信息^[11]。设计中,遥感相机的大视场搜索模块采用推扫成像,通过遥感相机和地表景物相对位置的变化进行扫描成像,高分辨成像模块采用凝视成像。遥感相机中的搜索模块采用推扫方式来实现大范围的广域搜索,发现目标并进行数据反馈后,通过调整卫星姿态,使系统光轴对准搜索区域中的目标进行可见光和中波红外波段高分辨凝视成像。

高分辨率成像模块采用同轴折反射式光学系统,搜索模块采用离轴反射式光学系统,各系统均共用一个大口径反射镜,两成像模块采用相同视场,可同时提取同一目标的可见光和中波红外波段的图像信息。设计时,优先对大视场搜索模块进行设计优化,达到设计指标后,固定主镜的各项参数并在此基础上设计可见光成像模块及中波红外成像模块。

2.1 可见光搜索模块设计

可见光搜索模块的子午方向仅具有零视场,但在弧矢方向具有较大观察视场角($\pm 5^\circ$)。搜索模块采用离轴四反结构,设计时,大口径主镜的面型选择抛物面,通过施加适当的偏心及倾斜,初步确定 M2 和 M3 两反射镜的位置,并将孔径光阑设置在次镜 M2 处。入射光束首先通过共用的大口径主镜(M1)下半部反射,经过反射镜 M2 将光束再次反射到 M1 的上半部分,最后利用反射镜 M3 将光束成像在像面处。可见光搜索模块的结构图如图 1 所示。

由于离轴结构具有非旋转对称性,离轴物点在子午和弧矢方向的聚焦存在较大差异。Biconic Zernike 自由曲面在 x 、 y 方向上具有不同的曲率和圆锥系数^[12],适合大散光的校正,因此 M2、M3 反射镜的面型选择 Biconic Zernike 自由曲面面型,Biconic Zernike 自由曲面由二次项、高次项和 Zernike 项三部分组成,

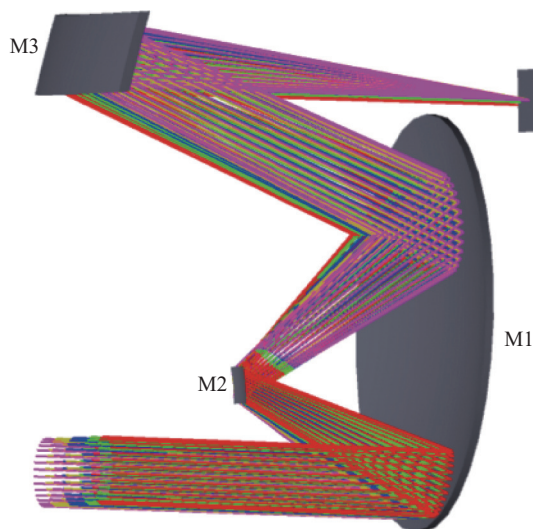


图 1 可见光搜索模块结构图

Fig.1 Structure of visible light search module

其方程为:

$$z = \frac{c_x x^2 + c_y y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_x) c_x^2 x^2 - (1 + k_y) c_y^2 y^2}} + \sum_{i=1}^{16} \alpha_i x^i + \sum_{i=1}^{16} \beta_i y^i + \sum_{i=1}^N A_i Z_i(\rho, \theta) \quad (2)$$

式中: c_x 和 c_y 为 x 和 y 方向的曲率; k_x 和 k_y 为二次曲面系数; α 和 β 分别为 x 和 y 的非球面系数; A_i 为标准泽尼克多项式中第 i 个系数; ρ 为归一化的径向坐标, θ 为角坐标。拟合后 M2、M3 自由曲面反射镜的面型如图 2 所示。

另外,为了避免光束遮拦,利用 ZPL 宏来约束各反射镜之间的相对位置,并对 M2、M3 反射镜的偏心及倾斜等参数进行优化,同时将像面倾斜一定角度来提升像质。经优化后,可见光搜索模块的焦距为 945 mm,工作 F 数为 4.0,弧矢方向全视场为 10° ,满足设计指标要求。图 3 为可见光搜索模块的调制传递函数(MTF)曲线。

对于可见光搜索模块,对应探测器的像元尺寸大小为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$,可得出其奈奎斯特频率为 33 lp/mm。由图 3 可见,可见光搜索模块各视场的 MTF 在奈奎斯特频率 33 lp/mm 处均大于 0.35,成像质量较好。

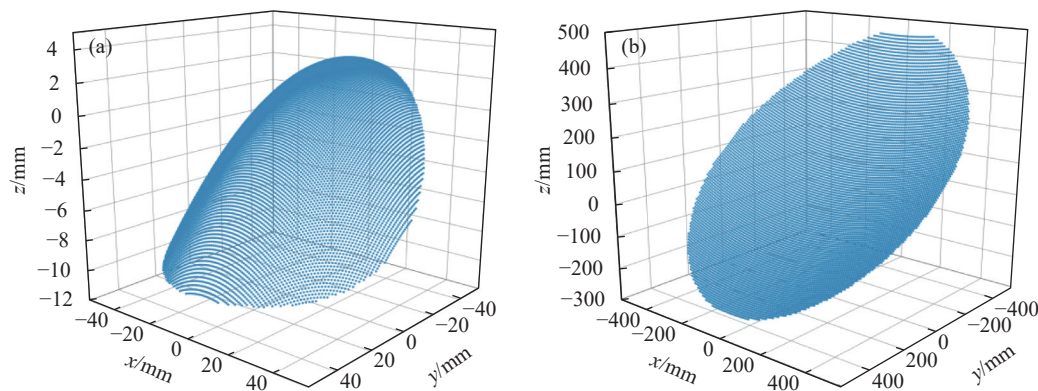


图 2 拟合后 M2、M3 自由曲面反射镜的面型。(a) M2 反射镜; (b) M3 反射镜

Fig.2 The surface shape of M2 and M3 free-form mirror after fitting. (a) Mirror M2; (b) Mirror M3

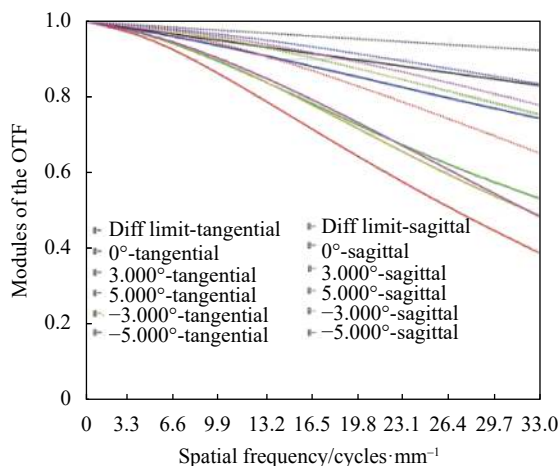


图 3 可见光搜索模块的 MTF 曲线

Fig.3 MTF curves of visible light search module

2.2 高分辨成像模块设计

对于成像模块而言,其空间分辨率越高,获取的图像信息就越丰富。在卫星的运行轨道高度确定的前提下,可通过增加系统焦距来提高卫星的地面分辨率,因此系统采用同轴两反的结构来适应长焦距,并加入折射镜组校正像差。设计时,首先固定主镜的各项参数,并在此基础上对可见光成像模块进行设计优化,达到设计指标后再设计中波红外成像模块。

2.2.1 可见光成像模块设计

同轴两反光学系统的初始结构可由像差理论中相关公式计算得出^[13]。对初始结构进行优化时,将孔径光阑置于主镜上,以此减小主镜尺寸和系统成本。通过控制次镜的尺寸,确保系统具有较小的遮拦比,同时采用三片球面透镜来校正系统的残余像差。优

化后,系统的 F 数为 5.25,遮拦比为 0.226,主镜的面型为抛物面,次镜的面型为双曲面。系统总长为 800 mm,焦距为 4200 mm,筒长焦距比为 1/5.25。考虑到搜索模块 M2 反射镜的存在会引起同轴系统的遮拦,设置遮拦后,可见光成像模块的光学系统结构如图 4 所示。

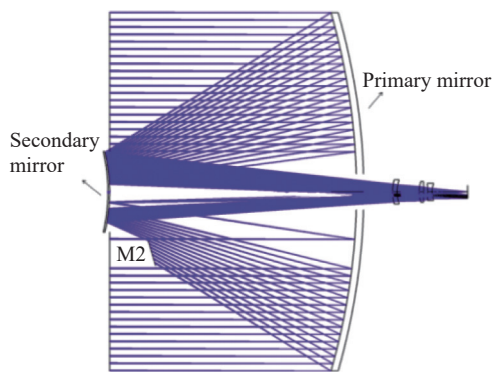


图 4 可见光成像模块结构图

Fig.4 Structure of visible light imaging modul

对于可见光成像模块,对应探测器的像元尺寸大小为 $3.76 \mu\text{m} \times 3.76 \mu\text{m}$ 。根据奈奎斯特采样定律,可得出奈奎斯特频率为 133 lp/mm。图 5 和 6 分别为可见光成像模块的点列图和 MTF 曲线。

虽然反射镜 M2 的存在会造成一定遮拦,但遮拦面积较小且不在光轴中心,对系统成像质量影响较小。由图 5 可见,可见光成像模块(加入遮拦后)的各个视场的弥散斑均收敛于艾里斑以内,且最大的 RMS 半径仅为 $1.433 \mu\text{m}$ 。如图 6 所示,可见光成像模块的 MTF 曲线接近衍射极限,且在奈奎斯特频率处,各视场的 MTF 均大于 0.3。

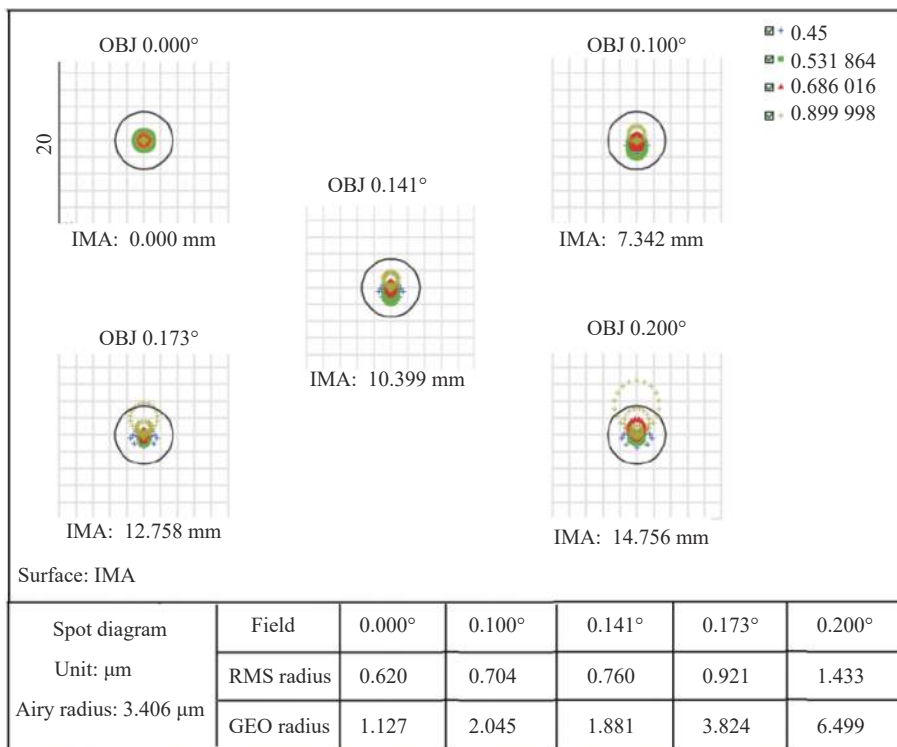


图 5 可见光成像模块的点列图

Fig.5 Spot diagram of visible light imaging module

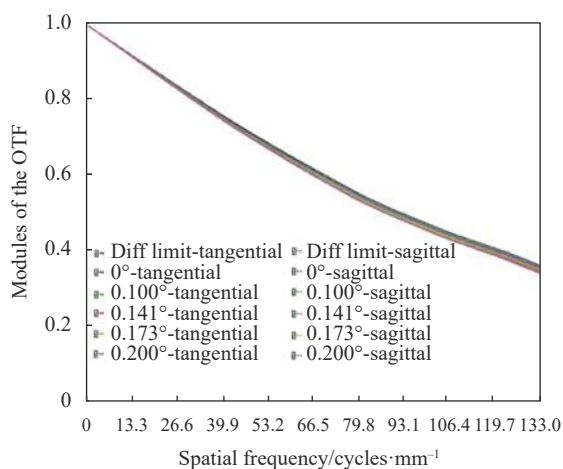


图 6 可见光成像模块的 MTF 曲线

Fig.6 MTF curves of visible light imaging module

2.2.2 中波红外成像模块设计

中波红外成像模块的结构如图 7 所示, 其中反射至 M2 的光束将进入搜索系统。该模块与可见光成像模块共用大口径主镜, 次镜材料选用中波红外波段透过率较高的 ZnSe, 其材料杂质少, 吸收系数小, 可以降低对中波探测能量的损耗^[14]。次镜的后表面镀全介质膜, 可实现次镜位置处反射可见光波段, 同

时透射中波红外波段。为了使系统具有较高的探测灵敏度和响应度, 需将制冷型探测器的光阑置于探测器的冷屏处, 以获得 100% 的冷光阑效率^[15]。

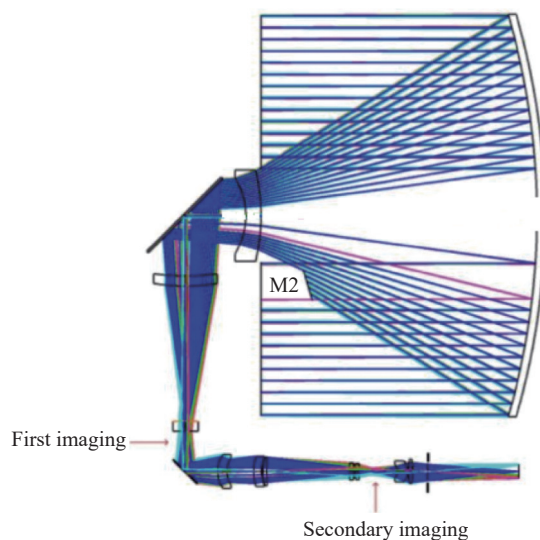


图 7 中波红外成像模块结构图

Fig.7 Structure of medium wave infrared imaging module

优化时, 采用三次成像的结构来减小后端透镜的尺寸, 将系统的出瞳位置放置在冷光阑处, 并利用六

片 Ge 镜和三片 Si 镜来校正大口径系统带来的各种像差。利用两块平面反射镜将光路进行折叠。优化后,中波红外成像模块焦距为 4000 mm, F 数为 5.0。图 8 和图 9 分别为中波红外成像模块的 MTF 曲线和点列图。

对于中波红外成像模块,对应探测器的像元尺寸大小为 $25\ \mu\text{m}\times 25\ \mu\text{m}$,可求得其奈奎斯特频率为 20 lp/mm。由图 8 可以看出,该模块的各个视场的弥散斑均收敛于艾里斑内。由图 9 可以看出,中波红外成像模块的 MTF 在 20 lp/mm 均优于 0.35,曲线平滑且贴近衍射极限,可见其具有良好的成像质量。

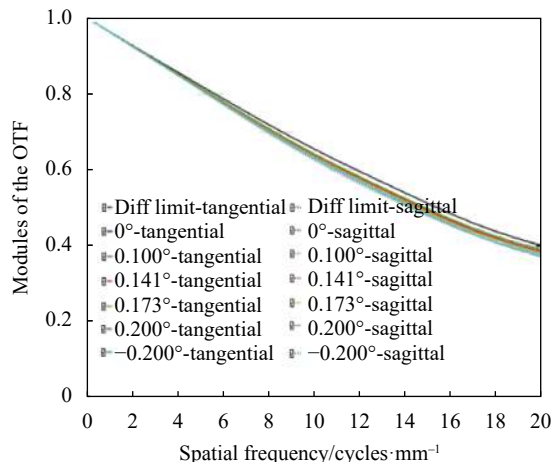


图 8 中波红外成像模块的 MTF 曲线

Fig.8 MTF curves of medium wave infrared imaging module

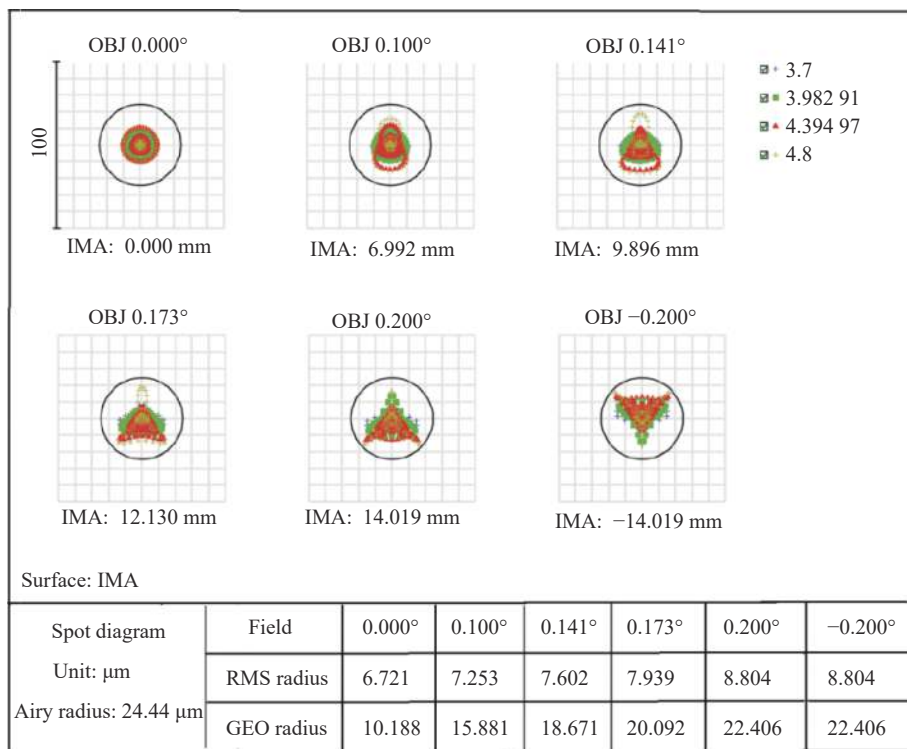


图 9 中波红外成像模块点列图

Fig.9 Spot diagram of medium wave infrared imaging module

2.3 一体化光学系统

整合后的大视场搜索与高分辨成像一体化光学系统整体如图 10 所示,图 11 为主镜 M1 的光迹图。整合后的光学系统总长为 0.8 m,宽度为 0.8 m,高度为 1.1 m。

由图 11 可以看出,系统的遮拦主要由可见光成像模块的次镜和大视场搜索模块中的 M2 反射镜引

起,其中次级的遮拦比为 5.063%,M2 反射镜遮拦面积仅占整个大口径主镜面积(除去次镜面积)的 0.8%,同时两者的垂轴距离预留出 20 mm 的间距,为后续系统的机械结构留出一定余量。

整套光学系统的质量主要集中于高分辨成像模块中的大口径反射主镜 M1 和次镜,以及可见光搜索模块中的自由曲面反射镜 M2 和 M3。反射镜材料采

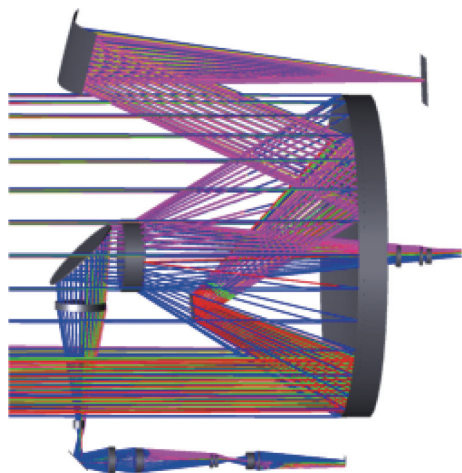


图 10 光学系统整体图

Fig.10 Optics system configuration

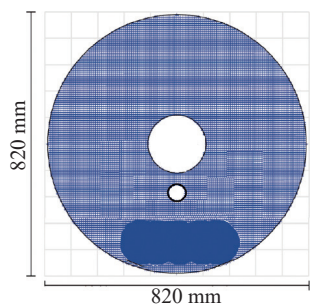


图 11 主镜 M1 的光迹图

Fig.11 Light trace of incident rays on M1

用 SiC 陶瓷材料,并根据实际加工经验,按照 8 : 1 的径厚比给定各个反射镜的中心厚度,可估算出光学系统的整体质量约为 140 kg。

该空间遥感相机的轨道高度为 500 km,其中可见光和中波红外成像模块在 0.4°的全视场范围内,分别实现对 2.813 km×1.879 km 和 1.228 km×0.922 km 的区域进行观测,其中可见光成像模块的地面分辨率优于 0.45 m,中波红外成像模块的地面分辨率优于 3.2 m。搜索模块在弧矢视场 10°范围内将以 8 m 的地面分辨率完成 33 km 线宽的推扫成像。

该系统通过复用大口径主镜的形式将三个分离的模块整合至一个系统中,使得系统结构更为紧凑,且具有良好的像质,能够满足系统的大视场搜索和小视场多波段高分辨成像的需求。

3 公差分析

3.1 成像模块公差分析

公差分析为光机零件加工和组件装调提供精度

控制参考值。经过公差分析,满足高分辨成像模块的加工公差及装调公差,分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 元件的加工公差

Tab.2 Machining tolerance of components

Item	Parameter
Fringes	±1.0
Thickness/mm	±0.02
Surface tilt/(")	±0.5
Surface decenter/mm	±0.02

表 3 元件的装调公差

Tab.3 Assembly and adjustment tolerance of components

Item	Parameter
Interval/m	±0.02
Element tilt/(")	±0.5
Eccentric element/mm	±0.02

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 $\lambda/15@633\text{ nm}$,且主次镜的元件偏心倾斜为 10"。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,可见光成像模块及中波红外成像模块的公差分析结果分别如表 4 和表 5 所示。

表 4 可见光成像模块公差分析结果

Tab.4 Tolerance analysis result of visible light image module

Title	Result
Traceable Monte Carlo generation number	1 000
The name of the MTF value	0.367
The average MTF	0.285
MTF value of 98% lens	>0.214
MTF value of 90% lens	>0.240
MTF value of 80% lens	>0.258
MTF value of 50% lens	>0.288
MTF value of 20% lens	>0.313
MTF value of 10% lens	>0.323
MTF value of 2% lens	>0.338

由表 4 和表 5 可以看出,在给定的公差范围内,可见光成像模块有 98% 的概率使其 MTF 在 133 lp/mm

表 5 中波红外成像模块公差分析结果

Tab.5 Tolerance analysis results of medium wave

Title	Result
Traceable Monte Carlo generation number	1 000
The name of the MTF value	0.396
The average MTF	0.283
MTF value of 98% lens	>0.201
MTF value of 90% lens	>0.212
MTF value of 80% lens	>0.245
MTF value of 50% lens	>0.290
MTF value of 20% lens	>0.341
MTF value of 10% lens	>0.361
MTF value of 2% lens	>0.385

处大于 0.214, 满足设计指标要求; 当中波红外成像模块公差满足要求时, 有 98% 的概率使得其 MTF 在 20 lp/mm 处大于 0.201。

3.2 搜索模块公差分析

自由曲面因其非旋转对称性, 加工难度更大, 故对其进行加工工程分析更重要。面型公差是指加工后的面型与理想面型的差异, 面型公差会导致光学系统性能下降。因此, 应对系统中的自由曲面进行面型公差分析以确定容许的误差范围。Zemax 光学软件可对传统球面及非球面进行面型公差分析, 但对于自

由曲面的面型分析存在局限性。因此, 文中采取随机统计法来对自由曲面进行面型公差分析^[16]。

搜索模块的反射镜 M2、M3 为 Biconic Zernike 自由曲面, 其面型方程已知, 在自由曲面上均匀取任意多个点, 根据方程可得任意点的矢高 $z_{i,j}$ 为:

$$z_{i,j} = f(x_{i,j}, y_{i,j}) \quad (3)$$

在公式 (3) 上加入一个随机变量 $\Delta z_{i,j}$, 可表示加工过程中产生的面型误差, 其任意点矢高变为:

$$z'_{i,j} = z_{i,j} + \Delta z_{i,j} \quad (4)$$

其中:

$$\Delta z_{i,j} = Hr_{and} \quad (5)$$

式中: H 为面型误差峰谷值; r_{and} 为 0~1 区间的随机数。

根据引入随机误差的自由曲面的数据点, 重新拟合成新的自由曲面并输出自由曲面的各项参数, 最后导入到 Zemax 中查看搜索模块的光学性能。

根据随机统计法, 搜索模块的两个自由曲面的表面面型误差峰谷值 H 分别为 $0.25 \mu\text{m}$ 和 $0.17 \mu\text{m}$ (搜索模块的系统主波长为 $0.587 \mu\text{m}$)。图 12 为在对应 H 下的随机 20 组公差下的 MTF 数据。搜索模块的 MTF 在 33 lp/mm 处均大于 0.2, 可见自由曲面的面型精度公差分析合理。

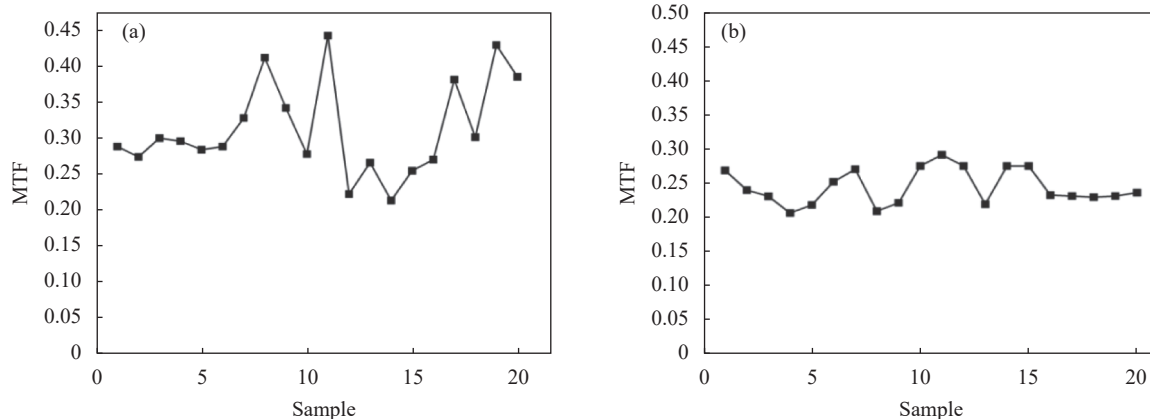


图 12 样本数 20 组下两个自由曲面的公差分析。(a) H 为 $0.25 \mu\text{m}$ 下反射镜 M2 的 MTF 分布; (b) H 为 $0.17 \mu\text{m}$ 下反射镜 M3 的 MTF 分布
Fig.12 Tolerance analysis of two freeform surfaces under 20 sets of samples. (a) MTF distribution of mirror M2 with H of $0.25 \mu\text{m}$; (b) MTF distribution of mirror M3 with H of $0.17 \mu\text{m}$

4 结论

文中根据给定的技术参数要求, 设计了一种具备大视场搜索与高分辨成像的遥感相机光学系统。其

中, 大视场搜索模块与成像模块共用一个大口径反射镜, 利用次镜分光的方式将成像模块分为可见光和中波红外两成像模块; 并将搜索模块与高分辨成像模块一体化设计, 降低了系统的体积和质量。经公差分

析, 搜索模块和高分辨成像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, 对于多模卫星光学载荷的设计具有一定的参考价值, 同时在卫星遥感领域具有一定的应用前景。

参考文献:

- [1] Sun Weiwei, Yang Gang, Chen Chao, et al. Development status and literature analysis of China's earth observation remote sensing satellites [J]. *Journal of Remot Sensing*, 2020, 24(5): 479-510. (in Chinese)
- [2] Du Kang, Liu Chunyu, Liu Shuai, et al. Design of coaxial ultra-compact primary and tertiary mirror integrated optical system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(7): 072202. (in Chinese)
- [3] Xie Haoran, Wang Xiaowei, Chen Xi, et al. Communication-navigation integrated technology and its application in lunar exploration [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2021, 8(2): 154-162. (in Chinese)
- [4] Li Deren, Wang Mi, Yang Fang, et al. A new generation of intelligent mapping and remote sensing scientific test satellite Luojia-301 [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(6): 789-796. (in Chinese)
- [5] Meng Qingyu. Overview of three-mirror reflective optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 20210986. (in Chinese)
- [6] Xu Wei, Jin Guang, Wang Jiaqi. Optical imaging technology of JL-1 lightweight high resolution multispectral remote sensing satellite [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(8): 1969-1978. (in Chinese)
- [7] Zhao Yuchen, He Xin, Feng Wentian, et al. Design of common aperture coaxial field-bias optical system used in area array imaging sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0718004. (in Chinese)
- [8] Sun Yongxue, Xia Zhentao, Jiang Shouwang, et al. Optical system design of remote sensing camera with visible light all-day [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 0114003. (in Chinese)
- [9] Li Qinglin, Cai Yuanyuan, Zhang Zhifei, et al. Opto-mechanical structure design of vertical off-axis TMA system camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(10): 20220303. (in Chinese)
- [10] Yu Longjiang, Jiang Fanghua, Jiang Yang, et al. Design of agile satellite's active scanning imaging mode on general track [J]. *Spacecraft Engineering*, 2019, 28(1): 27-34. (in Chinese)
- [11] Ji H R, Zhu Z B, Tan H, et al. Design of a high-throughput telescope based on scanning an off-axis three-mirror anastigmat system [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(10): 421998.
- [12] Chen Xingtao, Su Zhouping, Pan Hongxiang, et al. Design of freeform off-axis reflective afocal systems by orthogonal seed curve extension algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1): 0108001. (in Chinese)
- [13] Shan Qiusha, Xie Meilin, Liu Chaohui, et al. Design of cooled long-wavelength infrared imaging optical system [J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(1): 72-78. (in Chinese)
- [14] 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.
- [15] 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)
- [16] Zhang Yangliu, Su Zhouping, Pan Hongxiang, et al. Optical design and tolerance analysis freeform automotive head-up display [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(9): 0922002. (in Chinese)

Optical system design of common-aperture multimode remote sensing camera

Peng Liwei, Zhang Minglei, Chen Yu*, Jiang Lusong, Dong Dapeng

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

Abstract:

Objective Scenery changes on the earth are utilized for space remote sensing cameras to perform imaging during flying around the earth. The larger field of view a space remote sensing camera has, the larger observation area on the earth the system will obtain. However, high-resolution imaging is usually achieved by using an optical system with large aperture, which will lead to more aberration. This will further limit the field of view of the system. At present, the remote sensing cameras equipped in most satellites cannot have both large-field-of-view

detection and high-resolution recognition. Aiming at this problem, a compact space remote sensing camera with large-field-of-view search and multi-band high-resolution imaging is designed in this paper.

Methods The integrated optical system with functions of large-field-of-view search and high-resolution imaging is shown (Fig.10). A primary mirror with large aperture is shared by the large-field-of-view search module and the high-resolution imaging module, to reduce the weight and overall size volume of the system. Cassegrain structure is adopted in the high-resolution imaging module, involving a visible-light imaging module and a mid-wave infrared imaging module, which are splitted by the secondary mirror. An off-axis four-mirror structure is adopted in the large-field-of-view search module. Two freeform mirrors with the Biconic-Zernike shape are used to correct the aberrations.

Results and Discussions In this paper, an optical system for a compact space remote sensing camera with both large-field-of-view search and high-resolution imaging is proposed. The overall weight of the optical system is about 140 kg, and the overall volume is $0.8\text{ m}\times 0.8\text{ m}\times 1.1\text{ m}$. The focal length of the large-field-of-view search module is 945 mm with field of view in the sagittal direction of 10° . The diameter of the entrance pupil is 130 mm and the working waveband is $0.45\text{--}0.9\ \mu\text{m}$. The optical structure is shown (Fig.1). The resolution of $4\ 096\times 4\ 096$ for the detector is adopted with pixel size of $15\ \mu\text{m}\times 15\ \mu\text{m}$. When the orbit height is 500 km, the system can search the ground with line width of 33 km and ground resolution of 8 m. The high-resolution imaging module is composed of a visible light imaging module and a mid-wave infrared (MWIR) imaging module. The focal length of the visible-light imaging module is 4 200 mm. The resolution of $6\ 252\times 4\ 176$ for the detector is adopted with pixel size of $3.76\ \mu\text{m}\times 3.76\ \mu\text{m}$. The MWIR imaging module has a focal length of 4 000 mm, a detector resolution of 384×288 and a pixel size of $25\ \mu\text{m}\times 25\ \mu\text{m}$. A large-aperture primary mirror is shared by a visible-light module and a MWIR imaging module, with the same diameter of 800 mm. When the orbital height is 500 km, the visible-light and MWIR imaging modules can image the area of $2.813\text{ km}\times 1.879\text{ km}$ and $1.228\text{ km}\times 0.922\text{ km}$ respectively, within the full field of view of 0.4° . The ground resolution for the visible-light imaging module and MWIR imaging module are better than 0.45 m and 3.2 m respectively. The tolerance values are given according to the processing requirements. The tolerance analysis of the system is then carried out, in which the random-statistical method is used in the search module to perform surface-tolerance analysis on freeform surfaces. The analysis results show the MTF values of the visible-light imaging module, MWIR imaging module and search module within full FOV are all greater than 0.2 at Nyquist frequency (133 lp/mm, 20 lp/mm and 33 lp/mm). The optical system can meet the requirements of actual processing and assembly.

Conclusions With the rapid development of space remote sensing technology, space remote sensing cameras need to obtain larger field of view and higher resolution. In this paper, an optical system in remote sensing camera is proposed, involving a high-resolution imaging module and a large-field-of-view search module, which has the functions of both large-field-of-view search and multi-band high-resolution imaging. The system has a compact structure, which is beneficial to realize miniaturization and lightweight of the system. The optical system has certain reference value for the design of multi-mode satellite optical payload.

Key words: optical design; integrative optical system; remote sensing camera; multi-waveband

Funding projects: Project of Educational Department of Jilin Province (JJKH20210821KJ)