

可见光全天时遥感相机光学系统设计

孙永雪,夏振涛,姜守望,王珂,孙征昊

(上海卫星装备研究所,上海 200240)

摘要: 由于微光遥感可在夜间和晨昏时段等低照度条件下对地物进行探测,该遥感相机利用微光遥感与传统可见光遥感进行互补,实现可见光波段全天时对地观测。考虑系统长焦距(500 mm)、大视场($5^\circ \times 2^\circ$)、大相对孔径(F 数为 3.8)、小型化、高光学效率等各方面因素,该遥感相机最终采用离轴三反结构形式,采用双探测器共光路、分视场形式实现微光、可见光探测器同时成像。对光学系统设计和成像质量进行了详细分析,传统可见光波段各视场 MTF 优于 $0.4@200$ lp/mm,微光可见光波段各视场,MTF 优于 $0.75@77$ lp/mm,MTF 接近衍射极限,结果表明:根据光学载荷研制发射流程,从加工、装调、一次调焦和不调焦四个过程详细分析了系统公差,给出了公差分配结果。此外,对该光学系统的可扩展性进行了分析说明。

关键词: 离轴三反系统; 光学设计; 公差分析; 微光遥感

中图分类号: TH702 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA202049.0114003

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

Sun Yongxue, Xia Zhentao, Jiang Shouwang, Wang Ke, Sun Zhenghao

(Shanghai Institute of Spacecraft Equipment, Shanghai 200240, China)

Abstract: Because micro-light remote sensing can detect ground objects under low illumination conditions such as nighttime and twilight, this remote sensing camera uses micro-light remote sensing to complement the traditional visible light remote sensing to achieve observation in visible light all-day long. Considering the system's long focal length (500 mm), large field of view ($5^\circ \times 2^\circ$), large relative aperture (F number 3.8), miniaturization and high optical efficiency, this remote sensing camera used off-axis three-mirror system structure and common light path for double detectors, subfield of view to achieve simultaneous imaging from micro-light and visible light detectors. The optical system design and imaging quality of the optical system of the camera were analyzed in detail. The results show that the modulation transform function (MTF) of traditional visible light fields of view are more than 0.4 at the Nyquist frequency of 200 lp/mm and the MTF of micro-light fields of view are more than 0.75 at the Nyquist frequency of 77 lp/mm and the MTF is close to the diffraction limits. Based on development and launch processes of optical load, system tolerances were analyzed from the four processed of

收稿日期: 2019-10-11; 修订日期: 2019-11-21

作者简介: 孙永雪(1988-),女,工程师,硕士,主要从事光学系统设计和装调方面的研究。Email: 983042171@qq.com

machining, alignment, primary focusing and non-focusing, and the result of tolerant assignment was given. In addition, the extensibility of the optical system was illustrated.

Key words: off-axis three-mirror system; optical design; tolerance analysis; micro-light remote sensing

0 引言

微光遥感成像技术是利用微光像增强 CCD 弥补现有 CCD 成像器件的不足,可以在夜间、晨昏等低照度条件下进行地物探测,主要特点是低噪声、高灵敏度、大动态范围等,该技术的应用将大大拓展各类航天器的有效工作照度条件和时段范围,使遥感器在更宽的时段内进行对地观察、地面突发事件预警,如自然灾害、恐怖活动等^[1]。微光遥感技术可以广泛应用到社会经济参量估算、城市监测、重大事件变革、生态环境评估以及公共健康等领域。公开资料显示,目前国外微光遥感卫星主要有美国军事气象卫星计划(DMSP)搭载的线性扫描业务系统(OLS)和极地环境业务卫星(S-NPP)搭载的可见红外成像辐射仪(VIIRS),OLS 轨道高度 833 km,幅宽 3 000 km,地面分辨率 2.7 km,波段 0.4~0.95 μm ,VIIRS^[2]轨道高度 824 km,幅宽 3 040 km,地面分辨率 742 m,波段 0.5~0.9 μm ;国内长光卫星公司运营的“吉林一号”系列卫星 03 星具有夜光遥感功能,轨道高度 535 km,幅宽 11×4.5 km,波段 0.4~0.7 μm ,能够获取 1 m 分辨率的彩色夜光影像,此外,武汉大学联合长光卫星技术有限公司研制的“珞珈一号”科学实验卫星是全球首颗专业夜光遥感卫星,轨道高度 645 km,幅宽 260 km,地面分辨率 130 m,波段 0.4~0.8 μm ^[3]。

文中根据某商业航天项目白天传统可见光观测,晨昏和夜晚微光观测的需求,设计了一个微光、可见光共光路、分视场的光学系统。

1 光学系统设计

1.1 光学系统参数分析

光学系统主要参数计算公式在多篇文章中都有详细叙述,文中不再赘述^[4-5],本项目总体指标要求轨道高度 600 km 时,地面分辨率可见光 3 m,微光 7.8 m;考虑系统尺寸、现有国产微光探测器成熟

度最终选定微光探测器像元尺寸 6.5 μm ,像元数 2 048×2 048,根据光学系统几何成像关系公式,计算得出光学系统焦距 500 mm,选择可见光探测器像元尺寸 2.5 μm ,像元数 5 120×5 120;微光探测器与可见光探测器采用并列放置、分视场、共光路的设计形式,如图 1 所示,图中尺寸单位为 mm;图中高亮区域为两个探测器的感光区域, $\Phi 45.47$ mm 为两个探测器结构拼接在一起形成的外接圆,将黑色阴影区域作为光学系统成像的像方视场,则像方视场大小为 42.05 mm×17.3 mm,根据像方视场和焦距可以计算出其对应的物方视场角度为 $4.81^\circ \times 1.98^\circ$,考虑到两片不同的面阵探测器并列放置时,探测器封装及外围电路将占据一定尺寸,故将光学系统视场角设计为 $5^\circ \times 2^\circ$,以确保两个探测器都在视场内。

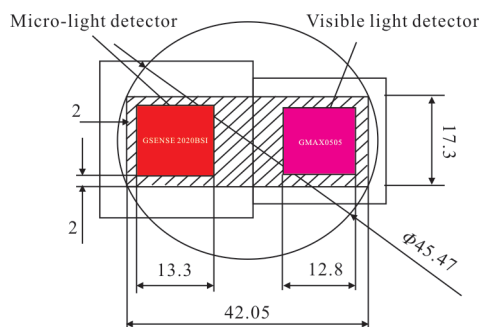


图 1 可见光、微光探测器位置示意图

Fig.1 Location diagram of visible light and micro-light detector

主要参数如下:

- (1) 探测谱段:400~800 nm;
- (2) 有效视场: $5^\circ \times 2^\circ$;
- (3) 焦距:500 mm;
- (4) F 数:3.8;
- (5) 光学效率:优于 90%;
- (6) 光学系统 MTF 设计值:微光优于 0.6@77 lp/mm,可见光优于 0.4@200 lp/mm。

1.2 光学系统设计过程

光学技术发展至今,设计研究出很多种类光学系统,主要有三种形式:折射式光学系统、折反式光学系统以及全反射式光学系统。反射光学系统具有不产生色差;口径和焦距都可以做的很大;光路可折

叠,便于缩短筒长使结构紧凑;易于轻量化;对温度变化不敏感等优点^[6-7]。目前,在光学系统设计中,考虑材料、重量、价格等因素,空间遥感多采用反射式结构。反射式光学系统分为同轴反射式和离轴反射式,离轴反射式系统无中心遮拦,光学效率高^[8];常用的离轴三反光学系统可分为无中间像面和有中间像面两种情况^[9-10],有中间像面离轴三反系统,可以在中间像面处加光阑,消杂光能力强,但是镜子离轴量相对较大,视场不易做太大,一般仅能达到 $1.5^{\circ}\sim 3^{\circ}$;有中间像面离轴三反系统容易做大视场,一般能达到 $3^{\circ}\sim 20^{\circ}$,但是杂散光抑制相对较难;一般情况下,一次像面在次镜和三镜中间的离轴三反系统相对无中间像面装调较容易。该光学系统视场角为 $5^{\circ}\times 2^{\circ}$,系统 F 数是 3.8,综合考虑系统视场、光学效率、外形尺寸等因素,选择无中间像面离轴三反结构形式。

离轴系统的初始结构确定一般分两种方式:一是先按照同轴系统设计,通过计算公式确定初始结构,再对系统进行离轴优化,具体公式计算在很多文章和书中都有详细介绍^[11-12];二是选择一个已有的指标相近的系统作为初始结构。该光学系统采用第二种形式进行设计,为了减小离轴三反系统的装调难度,该系统设计时让主、次、三镜母镜共轴,即镜子

无倾斜,且通过控制主镜与次镜距离、次镜与三镜距离、主三镜厚度达到主镜与三镜背面共面。系统优化过程中需要注意以下几个方面:

(1) 优化过程中视场离轴量不要作为优化变量,否则 ZEMAX 光学软件会默认减小离轴量,即趋向共轴系统,以达到提高像质的目的;

(2) 视场离轴过程中需关注像面与次镜之间的垂轴距离,以免间隔太小影响系统支撑结构设计,在主次三镜间距不变的情况下,视场离轴量越大像面与次镜之间的垂轴距离越大;

(3) 设计视场不变的情况下,增大系统结构或者使用高次非球面,可以使系统具有较大的像差校正能力;

(4) 非球面和高次项的使用可以有效减小系统像差,但要同时考虑加工、检测可行性,还要关注单个镜子的 F 数和非球面度;

(5) 设计的整体布局要考虑装调难易程度、结构小型化、轻量化。

1.3 光学系统设计结果

最终系统结构参数如表 1 所示,主镜为双曲面,次镜和三镜为扁圆面,主、三镜使用 4 阶高次项;系统布局如图 2 所示。

表 1 光学系统结构参数

Tab.1 Optical system structure parameters

Optical system comment	Diameter/mm	Radius/mm	Thickness/mm	Conic	4th order term
PM	204×166	-1 582.49	-325.00	-2.186	-5.146 0 e-011
SM	71	-604.84	330.00	0.259	-
TM	179×139	-661.99	-415.44	0.246	2.244 0 e-011

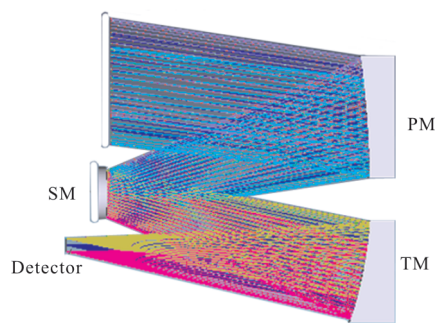


图 2 光学系统布局图

Fig.2 Layout of optical system

光学系统虽然经过优化和像差校正,但是把实际成像光学系统的全部像差都校正为零是不可能的,实际像一定会存在清晰度和形变的问题,这种实际像与理想像之间的差异叫做像差,像差是评价一个成像光学系统质量好坏的标准。

系统点列图如图 3 所示,以 600 nm 为中心波长,各视场弥散斑的最大均方根直径为 $1.702\ \mu\text{m}$;选择的探测器的像元尺寸可见光探测器为 $2.5\ \mu\text{m}$,微光探测器为 $6.5\ \mu\text{m}$,均在两个探测器一个像元内。图 4 为系统波像差,根据瑞利判断,波相差 PV

值不超过 $1/4\lambda$, RMS 值在 $1/14\sim 1/16\lambda$ 以内, 可认为系统成像质量是良好的, 由图可以看出, 该系统 PV 值为 0.1486λ , RMS 值为 0.0239λ , 表明成像质量良好。此相机使用的微光探测器像元尺寸为 $6.5\ \mu\text{m}$, 对应的奈奎斯特频率为 $77\ \text{lp/mm}$; 可见光探测器像元尺寸为 $2.5\ \mu\text{m}$, 对应的奈奎斯特频率为 $200\ \text{lp/mm}$, 由光学系统传递函数曲线图 5 可以看出, 系统在 $77\ \text{lp/mm}$ 处 MTF 在 0.75 以上, 在 $200\ \text{lp/mm}$ 处 MTF 在 0.4 以上, 与衍射极限重合, 满足设计指标要求。

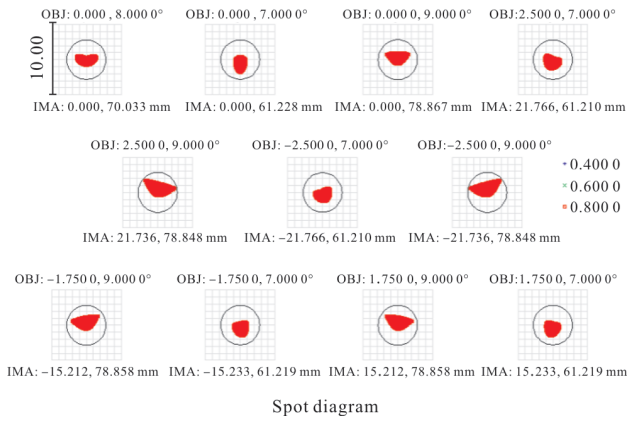


图 3 光学系统点列图

Fig.3 Spot diagram of optical system

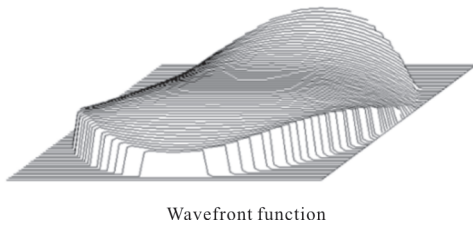


图 4 光学系统波像差

Fig.4 Wavefront aberration of optical system

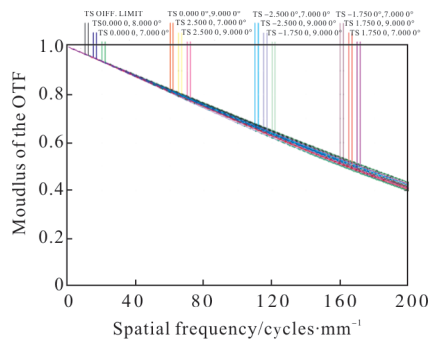


图 5 MTF 曲线

Fig.5 Curve of modulation transfer function

该光学系统由三个反射镜构成, 经与镀膜厂家沟通, 镀增强银膜和保护膜后, 镜面反射率在可见光范围内全部优于 97%, 因此总效率为 $n=0.97^3=0.913$, 满足指标要求。

2 公差分析

根据光学载荷研制发射流程, 相机公差分析主要分 4 个过程, 即加工过程、装配过程、一次调焦过程以及不调焦过程。其中加工过程主要对元件光学参数在加工过程中产生的误差对成像质量造成的影响进行分析, 加工过程中的元件光学参数主要有表面曲率半径、偏心率平方、元件厚度、中心偏、材料折射率、阿贝数和玻璃不均匀性等; 装配过程中主要对元件偏心、倾斜、各个镜面之间的轴向距离等误差引起的系统成像质量变化进行分析, 装配公差引起的光学性能变化可以通过各元件之间的间距及后截距等参数进行补偿^[13-14]; 一次调焦过程主要针对发射振动过程、在轨运行环境与地面装调环境不一致、微重力环境引起的系统性能变化进行分析, 该过程引入的误差可以通过调节系统焦点位置进行补偿; 不可调焦过程主要针对在轨运行时温控条件与一次调焦前不一致引起的光学系统成像质量变化, 此过程引入的误差无补偿措施。

由于可见光探测器相比于微光探测器像元要小, 仅 $2.5\ \mu\text{m}$, 故可见光光学系统公差要求较为严格, 因此该系统公差分析要求光学系统的弥散斑直径恶化到不超过一个像元尺寸 $2.5\ \mu\text{m}$, 系统波像差恶化到不大于 $0.072\lambda(\lambda=632.8\ \text{nm})$ 。

该光学系统加工过程的光学参数误差有主镜、次镜和三镜的 3 个曲率半径、3 个二次曲面系数、2 个非球面系数和面形不规则误差, 具体公差分配结果见表 2。

表 2 加工过程公差分配

Tab.2 Tolerance distribution of processing

Comment	Radius Δ/mm	Comic ΔC	4th order term ΔA	Surface error RMS/ λ
PM	± 1	± 0.002	$\pm -1.000\text{E}-013$	1/50
SM	± 0.4	± 0.001	/	1/60
TM	± 0.5	± 0.001	$\pm -5.000\text{E}-014$	1/50

该系统装调时,以主镜为基准,装配过程引起的光学系统性能变化可以通过主次镜间距、次镜三镜间距以及焦面离焦量等参数进行补偿,装配过程的公差来源包括次镜、三镜的偏心、倾斜,表 3 给出了装配过程公差分配结果。使用 zemax 对加工和装调的公差分配进行蒙特卡罗分析,结果 RMS Spot Radius (90%)<1.23 μm,RMS Wavefront Error (90%)<0.069λ,完全满足要求。

表 3 装调过程公差分配

Tab.3 Tolerance distribution of alignment

Comment	Decenter x/mm	Decenter y/mm	Tilt x/(")	Tilt y/(")
PM	-	-	-	-
SM	±0.05	±0.05	±20	±20
TM	±0.05	±0.05	±15	±15

一次调焦过程中引入的误差可以通过调节系统焦面位置进行补偿,表 4 给出了该过程公差分配结果,经过 1 000 次蒙特卡罗模拟分析,结果 RMS Spot Radius(90%)<1.25 μm,RMS Wavefront Error(90%)<0.071λ,分析结果满足要求。

表 4 一次调焦过程公差分配

Tab.4 Tolerance distribution of primary focusing

Comment	Thickness Δd/mm	Decenter x/mm	Decenter y/mm	Tilt x/(")	Tilt y/(")
PM	±0.3	±0.04	±0.04	±15	±15
SM	±0.3	±0.05	±0.05	±20	±20
TM	±0.3	±0.04	±0.04	±15	±15

不调焦过程引入的误差无调焦补偿措施,经过分析给出了不调焦过程公差分配结果,如表 5 所示,公差分析结果 RMS Spot Radius (90%)<1.250 μm,RMS Wavefront Error(90%)<0.072 λ,该分析结果基本满足要求。

表 5 不调焦环节公差分配

Tab.5 Tolerance distribution of non-focusing

Comment	Thickness Δd/mm	Decenter x/mm	Decenter y/mm	Tilt x/(")	Tilt y/(")
PM	±0.005	±0.03	±0.03	±15	±15
SM	±0.005	±0.03	±0.03	±15	±15
TM	±0.005	±0.03	±0.03	±15	±15

3 可扩展性分析

该光学系统具有大视场、小 F 数的特点,具有很大的可扩展性,在不改变任何系统参数基础上对该系统进行可扩展性分析。

(1) 直接将探测器换成红外探测器。短波红外拟选用像元尺寸 12 μm,地面分辨率 14.4 m@600 km,系统 MTF 达到 0.7@43 lp/mm;中波红外拟选用像元尺寸 25 μm,地面分辨率 30 m@600 km,系统 MTF 达到 0.6@20 lp/mm;长波红外拟选用像元尺寸 12 μm,4×4 合并像元,地面分辨率 57.6 m@600 km,系统 MTF 达到 0.48@11 lp/mm;

(2) 在系统前面加扫描镜,扩大视场。如图 6 所示,在主镜前面加扫描镜,探测器可以用拼接线阵或者面阵,利用卫星飞行方向运动和摆镜垂直飞行方向摆动,可以扩大扫描视场;

(3) 在系统中加入中继系统,实现可见光、红外同时成像。该离轴三反系统采用视场离轴,系统视场不对称,扩展光路全部采用透镜,对于系统像差校正有一定困难,尤其要注意控制畸变。

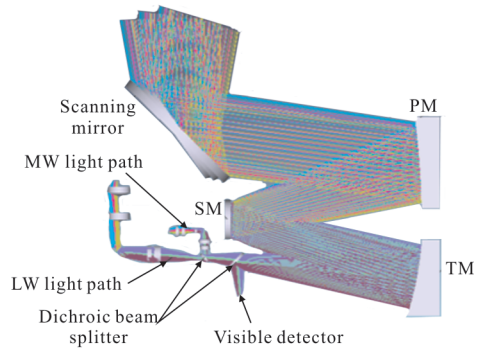


图 6 可见光、红外同时成像布局图

Fig.6 Layout of visible light and infrared simultaneous imaging

4 结论

设计了一种微光、可见光双探测器离轴三反光学系统,利用微光探测器可在低照度条件下进行地物探测的优势,与传统高分辨率可见光探测器进行优势互补,实现可见光全天时对地遥感。该光学系统采用视场离轴形式,离轴角 8°,在要求的波段范围内,MTF 曲线接近衍射极限,各视场成像质量好,满足系统指标要求;系统设计时除满足指标要

求外,还兼顾了加工、装调难度,系统主、三镜背面共面设计,主、次、三镜位置均无倾斜和偏心,即 3 个反射镜母镜共光轴;对加工、装调、一次调焦和不调焦 4 个过程进行公差分析,通过软件模拟,验证了公差分配合理性,进一步验证了该系统可实现性;对该光学系统进行了可扩展性分析,给出三种可扩展方法,基于该系统大视场、小 F 数特点,该系统后续在波段和视场方面都具有较灵活的可扩展性。

参考文献:

- [1] Guo Hui, Xiang Shiming, Tian Minqiang. A review of the development of low-light night vision technology [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(2): 63–68. (in Chinese)
- [2] Li Lijin, Li Haoyang, Xu Pnegmei, et al. Simulation and verification of imaging strategy for low-light-level camera on dawn-dusk orbit [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2017, 38(5): 29–34. (in Chinese)
- [3] Li Beibei, Han Bing, Tian Tian, et al. Application status and future development of JL-1 video satellite [J]. *Satellite Application*, 2018, 3: 23–27. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] Shi Lili. The design and research on the optical system of the space remote sensor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [6] Xu Yihang. Design of off-axis three-mirror optical system with free-form surface [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017. (in Chinese)
- [7] Zhao Wencai. Design of improved off-axis TMA optical systems [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2011, 19(12): 2838–2843. (in Chinese)
- [8] Jiang Xiwen, Jia Xuezhi, Cong Shanshan. Application of freeform surfaces in cooled off-axis three-mirror optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0918004. (in Chinese)
- [9] Li Xuyang, Ni Dongwei, Yang Mingyang, et al. Design of large field of view space camera optical system based on freeform surfaces [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0922003. (in Chinese)
- [10] Wang Bin, Wu Fan, Ye Yutang. Computer aided alignment for off-axis TMA system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1118006. (in Chinese)
- [11] Luo Qin, Zhang Dongdong, Niu Xinhua. Optical design of off-axis three-mirror system with wide field [J]. *Infrared*, 2017, 38(8): 14–18. (in Chinese)
- [12] Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004: 130–138. (in Chinese)
- [13] Wang Hong, Tian Tieyin. Design of three line array mapping camera and its tolerance analysis [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2011, 19(7): 1444–1449. (in Chinese)
- [14] Wang Hong, Hu Zhong. Analysis and research of multispectral camera optical system [J]. *Optical & Optoelectronic Technology*, 2013, 11 (4): 67–71. (in Chinese)